



**Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

MÁSTER EN CONSTRUCCIÓN AVANZADA EN LA EDIFICACIÓN

Trabajo Final de Máster

APLICACIONES DE LA NANOTECNOLOGIA EN LOS MATERIALES DE LA CONSTRUCCIÓN

Proyectista: Georgios Tsotsis

Directora: Laia Haurie Ibarra

Convocatoria: Junio/Julio 2018

Resumen

El presente trabajo se enfoca en el análisis de las aplicaciones de la nanotecnología en el sector de la construcción. Se trata principalmente de recopilar y analizar los casos en los que actualmente se aplica la nanotecnología a los materiales de construcción. Esto se hace analizando la manera en la que ellos actúan, su forma nano y los beneficios que ofrecen. Así mismo, se revisan también unos casos de investigaciones en curso las cuales tendrán lugar en el mercado en un futuro próximo. Todo esto teniendo en cuenta el impacto ambiental, los aspectos de seguridad y los riesgos asociados con la manipulación de nano partículas.

El trabajo está estructurado en cuatro partes principales de desarrollo. La primera parte del trabajo se trata de estudiar los casos de aplicaciones de nano-tecnología a elementos con base cemento como el hormigón y el mortero. Allí, al principio se analiza lo que es el cemento y a continuación se presentan las diferentes posibles maneras de intervención de la nanotecnología en esto. Tanto para los casos reales que se aplican actualmente como para los casos que siguen en curso de investigación se presentan los mecanismos de acción y sus beneficios ofrecidos para la industria de la construcción. Sobre los casos en los que actualmente se aplica la nanotecnología, se realizó una investigación en el mercado tanto español como europeo y se presenta un listado con ejemplos de productos comercialmente existentes.

En la siguiente parte se estudian las aplicaciones de la nano-tecnología en recubrimientos para la construcción. En este caso, como en la parte anterior de los materiales cementosos, se presentan las diferentes posibles maneras de intervención de la nanotecnología a los recubrimientos de construcción. Además se desarrollan los beneficios ofrecidos y el funcionamiento tanto para los casos existentes actualmente como para los casos que siguen en curso de investigación. Como último se presenta también un listado con ejemplos de nano-productos comercialmente existente en el mercado español y europeo.

La tercera parte trata de estudiar y analizar el impacto del uso de nano-materiales sobre la seguridad, la salud laboral y el medio ambiente en general. Al principio se presentan los posibles riesgos que se generan debido al uso de nano-materiales y a continuación se desarrollan unas posibles medidas de prevención las cuales tienen como objetivo minimizar al máximo este impacto para la salud.

La última parte del trabajo es la experimental, la cual a través de unos ensayos realizados en el laboratorio de materiales de la EPSEB se trata de comprobar de manera práctica parte de las propiedades de algunos materiales que se presentaron a lo largo del trabajo. Con estos ensayos se trata de correlacionar algunas propiedades que ofrecen distintas combinaciones de adición de nano-partículas al hormigón con las mismas propiedades que ofrece el hormigón sin ninguna adición nano.

Tras todo el análisis, se puede observar que las aplicaciones actuales de la nano-tecnología ofrecen propiedades superiores a los materiales de la construcción, y analizando las investigaciones en proceso, parece seguro que el futuro viene mucho más comprometido.

Índice

	Página
Resumen	1
Glosario	8
1. Introducción	9
2. Objetivos.....	10
3. Estado del Arte	11
3.1 Nano-ciencia y Nano-tecnología	11
3.2 Bottom-Up y Top-Down	11
3.3 Nanotecnología y hormigón	12
3.4 Nanotecnología y Recubrimientos	13
3.5 Riesgos del uso de nano-tecnología	13
4. Aplicaciones de nano-tecnología en elementos con base cemento.....	14
4.1 El Hormigón.....	15
4.2 Modificación por medio de adición de nano-partículas	16
4.2.1 Nano-SiO ₂	17
4.2.2 Nano-Fe ₂ O ₃	18
4.2.3 Nano-Al ₂ O ₃	18
4.3 Aditivos Nano para materiales de cemento existentes en el mercado.....	18
4.4 Nano-TiO ₂	24
4.5 La fotocatalisis.....	24
4.6 Nano-Cementos foto-catalíticos existentes en el mercado.....	27
4.7 Reducción de las partículas de cemento a nano-polvo de cemento.....	31
4.8 Hibridación de C-S-H.....	32
4.9 Incorporación de Nano-Refuerzos: NanoTubos y NanoFibras	32
5. Aplicaciones de la nano-tecnología en recubrimientos	34
5.1 El uso de Nanopartículas	34
5.2 Recubrimientos hidrofílicos e hidrofóbicos	35

5.2.1 Hidrofobicidad	35
5.2.2 Hidrofilicidad	36
5.3 Recubrimientos Foto-catalíticos basados en óxido de titanio manométrico	36
5.4 Recubrimientos Resistentes a la Radiación UV	38
5.5 Recubrimientos y Vidrios Anti-Fuego	38
5.6 Recubrimientos Anti-Corrosión	39
5.7 Recubrimientos Anti-grafiti	39
5.8 Recubrimientos de Abrasión y Anti-desgastes	40
5.9 Recubrimientos Electrocrómicos	40
5.10 Recubrimientos Anti-hielo	40
5.11 Recubrimientos Fotovoltaicos	41
5.12 Recubrimientos-Nano existente en el mercado	41
6. Impacto del uso de nano-materiales sobre la seguridad y la salud laboral	45
6.1 Riesgos	45
6.1.1 Toxicidad de los nano-materiales	46
6.1.2 Exposición a nano-materiales	47
6.2 Medidas de prevención	47
6.2.1 Eliminación y sustitución	47
6.2.2 Medidas de control técnico	48
6.2.3 Medidas Organizativas	48
6.2.4 Protección Individual	49
7. Parte experimental	50
7.1 Materiales y plan de ensayos	50
7.2 Dosificaciones y Preparación de Probetas	52
7.3 Resistencia a Flexión	55
7.4 Resistencia a Compresión	57
7.5 Absorción al Agua Líquida	60
7.6 Densidad Aparente, Densidad Relativa. Porosidad	62
7.7 Permeabilidad al vapor de agua	64

7.8 Ensayo de determinación del ángulo de contacto estático.....	66
8. Conclusiones	68
9. Agradecimientos	69
10. Bibliografía.....	70
ANEXOS	77

INDICE DE FIGURAS, TABLAS y GRAFICOS

	Pagina
<u>FIGURAS</u>	
Fig. 1 Fase de Hidratación del Cemento	14
Fig. 2: Tamaño de nano-partículas y área específica superficial	16
Fig. 3 Nano-sílice en polvo	17
Fig.4 Partículas de nano-Sílice esféricas en distribución uniforme	17
Fig. 5 Nano-Fe ₂ O ₃ en polvo	18
Fig. 6 Nano-Al ₂ O ₃ en polvo	18
Fig. 7 Prefabricados de estructuras de hormigón.....	20
Fig. 8 Revestimiento in situ en proyectos de túneles	20
Fig. 9 Colocación de hormigón en condiciones invernales	20
Fig. 10 Nano-TiO ₂ en polvo	24
Fig.11 Proceso de fotocatalisis	25
Fig.12 Fotocatalisis en zonas urbanas.....	26
Fig.13 Iglesia Dives in Misericordia (Roma) de Richard Meier primera aplicación de TX ARIA	28
Fig.14 Iglesia de Lesu, San Sebastian, España Arquitecto: Rafael Moneo	28
Fig.15 Pavimento fotocatalítico en el puerto náutico de L' estartit , Girona	30
Fig.16 CAR Sant Cugat, Barcelona, Diciembre 2011 1500 m2 pavimento Ilosa vulcano air-clean®	30
Fig.17 Plaza Can Roses, Barcelona, Agosto 2010 2800 m2 pavimento Ilosa vulcano air-clean®	30
Fig.18 Arcilla Procesada.	31
Fig.19 Nanotubos de Carbono.....	32
Fig.20 Nanofibras de Carbono	33
Fig. 21 Puente de grietas observado en compuestos de cemento-CNT	33
Fig. 22 Sistema Fotovoltaico	41
Fig. 23: Trabajador de equipo de protección individual	49
Fig.24 Cemento y Árido (Arena).....	51
Fig.25 Molde de acero	52
Fig.26 Molde de Silicona	53
Fig.27 Balanza Eléctrica.....	53
Fig.28 Mezcladora Eléctrica	53

Fig.29 Probetas justo después de su deposición en los moldes	54
Fig.30 Probetas en la cámara de curado	54
Fig.31 Prensa para rotura por flexión y monitor	55
Fig.32 Prensa para rotura por compresión.....	57
Fig.33 Tubos Karsten sellados en la Superficie de la Probetas	60
Fig.34 Campana y bomba de vacío	62
Fig.35 Conjunto de molde y muestras cuadradas	64
Fig.36 Muestra de Cemento Portland	66
Fig.37 Muestra de la referencia CIV NANOSILICE MasterRoc MS685.....	66
Fig.38 Muestra de la referencia CI BASE	66
Fig.39 Muestra de la referencia CIII CENTRILIT FUME SX	66
Fig.40 Muestra de la referencia CII CENTRILIT NC	66

TABLAS

Tabla 1: Tipos de cemento	15
Tabla 2.1: Aditivos Nano para materiales de cemento existentes en el mercado.....	19
Tabla 2.2: Aditivos Nano para materiales de cemento existentes en el mercado.....	20
Tabla 2.3: Aditivos Nano para materiales de cemento existentes en el mercado.....	21
Tabla 2.4: Aditivos Nano para materiales de cemento existentes en el mercado.....	22
Tabla 2.5: Aditivos Nano para materiales de cemento existentes en el mercado.....	23
Tabla 3.1: Nano-Cementos foto-catalíticos existentes en el mercado	27
Tabla 3.2: Nano-Cementos foto-catalíticos existentes en el mercado	29
Tabla 4.1: Recubrimientos-Nano existentes en el mercado	42
Tabla 4.2: Recubrimientos-Nano existentes en el mercado	43
Tabla 4.3: Recubrimientos-Nano existentes en el mercado	44
Tabla 5 : Riesgos derivados de nano-materiales construcción	46
Tabla 6 : Dosificación de las Probetas	52

Tabla 7: Resistencias a flexión 7 días	56
Tabla 8: Resistencias a compresión 7 días.....	58
Tabla 9: Resistencias a compresión 21 días.....	58
Tabla 10: Absorción de agua en cada combinación de materiales	61
Tabla 11. Densidad aparente (Da), densidad relativa y el índice de porosidad accesible en %	63
Tabla 12. Resistencia al vapor de agua.....	65
Tabla 13. Determinación del 'ángulo de contacto estático.....	67

GRAFICOS

Gráfico 1: Resistencias a flexión 7 días	56
Gráfico 2: Resistencias a compresión 7 días	58
Gráfico 3: Resistencias a compresión 21 días	59
Grafico 4. Gráfico comparativo de absorción agua líquida entre las diferentes combinaciones de materiales	61

2. Glosario

Abreviaciones

(Nm): Nanómetro ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

(C-S-H): Silicato Cálcico Hidrato

(SiO₂): Dióxido de silicio

(NS): Nano Sílice

(nano-SiO₂): Nano-partículas de Dióxido de silicio

(TiO₂): Dióxido de Titanio

(nano-TiO₂): Nano-partículas de Dióxido de Titanio

(Fe₂O₃): Óxido de Hierro

(nano- Fe₂O₃): Nano-partículas de Óxido de Hierro

(Al₂O₃): Óxido de Aluminio

(nano- Al₂O₃): Nano-partículas de Óxido de Aluminio

(CO₂): Dióxido de Carbono

(NO_x): Monóxido de Carbono

(COV): Compuestos Orgánicos Volátiles

(SO_x): Óxidos de Azufre

(UV): Ultra Violeta

(AIF): Asociación Ibérica de Fotocatálisis

(Ca (OH)₂): Hidróxido Cálcico

(Puzolanicos): materiales silíceos o alumino-silíceos

(Nanoarcilla): Nanomaterial compuesto por un mineral de arcilla con espesores de capa de un nanómetro.

(CNT): Nanotubos de Carbono

(CNF): Nanofibras de Carbono

(SWCNT): CNT de monocapa

(MWCNT): CNT de multicapa

(PVD): Deposición Física de Vapor

(CVD): Deposición Química de Vapor

(ZnO): Óxido de zinc

(CeO₂): "Óxido de cerio

(NCE): Emulsión Nanocompuesta

(VO₂): Óxido de vanadio

(WO₃): Óxido de tungsteno

(NiO₂): Óxido de níquel

(SnO₂): Óxido estánico

(PCM): materiales orgánicos de cambio de fase

(LHS): Almacenamiento de calor latente

(CCRSEI): Comité Científico de los Riesgos Sanitarios Emergentes y Recientemente Identificados

(ADN): Ácido desoxirribonucleico

(CuO): Óxido de cobre

1. Introducción

En los últimos años el concepto más famoso correlacionado con el gran desarrollo en el mundo de la ciencia y la tecnología es la Nanotecnología [1] y debido a este concepto se pueden encontrar varios casos de innovación, en casi todos los sectores de la industria, en el sector medicina, de biología etc. entre otros [1]. Por ello que es una parte de ciencia y tecnología con gran impacto económico y potencial de mercado.[2] Dando una descripción breve sobre el concepto de la nanotecnología se definiría que *“La nanotecnología es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nano escala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nano escala.”*[3]

El sector de la construcción ha recibido también muchas innovaciones hasta hoy respecto al uso de nanotecnología y además está dentro de los sectores que más siguen experimentando, sobre todo en los materiales constructivos. La creación de materiales nanotecnológicos proporciona a parte de propiedades específicas, también una construcción mucho más eficiente, sostenible y con menor agresividad ambiental. [4]

Las aplicaciones de la nanotecnología en los materiales de construcción actualmente, ofrecen nuevas oportunidades en el sector, generando materiales con propiedades específicas y avanzadas como mayores resistencias mecánicas, mayor durabilidad, resistencia a la corrosión, resistencia al fuego, materiales súper-hidrofóbicos etc. Además, con la adición de ciertas nanopartículas se genera el efecto fotocatalítico heterogéneo lo cual ofrece nuevos materiales, auto-limpiables, anti-bacterianos, descontaminantes de óxidos como NOx, SOx, COVx de la atmósfera etc. [4]

En la actualidad los casos de aplicaciones más desarrolladas se encuentran en los materiales cementosos (hormigón, mortero) y en los recubrimientos para varios tipos de superficies de materiales de construcción como (vidrio, madera, metal, hormigón etc.).[4] Estos casos se desarrollan de manera fundamental a continuación de este trabajo, y también se presentan ejemplos de materiales existentes en el mercado, correspondientes a esos casos. El acero nano-estructurado es un caso que sigue estando en proceso de investigación y no tiene una clara aplicación real.

Por último, y para que este el estudio más completo, sería interesante poder comprobar algunas de la propiedades ofrecidas por la aplicación de la nanotecnología en los materiales. Por ello al final se presenta un ensayo propio realizado en el laboratorio que busca evaluar y comprobar los beneficios de las adiciones nano al hormigón.

2. Objetivos

Durante los últimos años el concepto de la nanotecnología se incorpora cada vez más tanto en la ingeniería en general como en la ingeniería de la edificación y a la construcción en especial. El desarrollo en la tecnología de materiales de construcción basada en nanotecnología viene en un ritmo muy rápido y las propiedades que conlleva muestran un futuro muy comprometido. En este desarrollo hay casos de nano-materiales existentes y realmente disponibles en mercado y hay casos de investigaciones en curso para estudiar las posibilidades futuras que puede llegar tener la aplicación de la nanotecnología en los materiales de construcción.

El objetivo de este trabajo es presentar al principio un cuadro genérico sobre las aplicaciones de la nanotecnología en los materiales de la construcción pero más que todo es enfocar en los casos prácticos, y realmente existentes actualmente, presentando también materiales existentes y disponibles en el mercado tanto español como europeo. Se presenta tanto la tecnología que están usando como las ventajas reales ofrecidas. El propósito es declarar y diferenciar los casos de aplicaciones basados aun en investigación teórica, con los casos prácticos y utilizables en la actualidad.

Para poder desarrollar este objetivo general y configurar el estado actual de los casos que la nanotecnología se aplica en los materiales de construcción se han planteado sub-objetivos como:

- Recopilar y analizar los casos de aplicaciones en los materiales más utilizados en el sector que son los materiales cementosos y los recubrimientos superficiales.
- Contactar con industriales y fabricantes de nano-materiales para poder reclamar más información y también muestra de los materiales mismos.

Como ultimo esta parte teórica de este trabajo tuvo como objetivo recopilar y analizar, el impacto del uso de nano-materiales sobre la seguridad y la salud laboral.

A parte del análisis de la parte teórica, se planeo como un objetivo del trabajo una parte práctica para poder formar una idea más completa sobre las propiedades ofrecidas y reales de la aplicación de nanotecnología en los materiales de la construcción. En esta parte práctica se presenta un ensayo del laboratorio donde se comparan las propiedades físicas y mecánicas entre formulaciones de hormigón con la misma base pero con diferentes nano-materiales aditivos.

3. Estado del arte

La introducción de la nanotecnología en la industria de la construcción los últimos años ha permitido grandes avances en distintas áreas, pero más que todo en los materiales constructivos, como el hormigón, los morteros, los recubrimientos, pinturas, vidrios, acero, madera, piedra natural etc. mejorando mucho sus propiedades. Se ha demostrado que poder estudiar, manipular y aplicar un material a su escala nano, genera propiedades y características a nivel macro, nuevas o superiores de las que conocíamos hasta hoy. A continuación se presenta como esta nueva innovación tecnológica funciona y como afecta tanto las propiedades, enfocándose principalmente en los materiales cementosos, recubrimientos, cristales etc.

3.1 Nano-ciencia y Nano-tecnología

El prefijo “**nano**” viene del griego enano y significa una milmillonésima parte de algo. Así que un nanómetro (1nm) es 1/1,000,000,000 parte de un metro. **La nano-ciencia y la nano-tecnología** son los términos principales para explicar dos vías de aplicación de la nanotecnología en la investigación. Por una parte, la nano-ciencia se ocupa del estudio y caracterización de la estructura de la materia a una escala nano métrica, generalmente comprendida entre 0,1-100 nm (1 nm=10⁻⁹), así para entender mejor cómo esta estructura afecta las propiedades y el rendimiento a escala macro mediante el uso de técnicas de caracterización avanzadas y modelos a nivel atómico o molecular. Por otra parte, la nanotecnología abarca las técnicas de manipulación de la estructura a escala nanométrica para desarrollar una nueva generación de compuestos multifuncionales, a medida, con un rendimiento mecánico y una durabilidad y características superiores que pueden tener una gama de propiedades novedosas como: mayores resistencias mecánicas, mayor durabilidad, baja resistividad eléctrica, resistencia a la corrosión, autolimpieza, resistencia al fuego, hidrofobicidad etc.[5]

3.2 Bottom-Up y Top-Down

Bottom-Up y Top-Down son dos estrategias de procesamiento de información y ordenamiento del conocimiento.

En la estrategia de Bottom-Up las estructuras de los materiales se diseñan de escala menor a escala mayor. Es decir que se crean directamente en este proceso sintetizando partículas nanométricas ó componentes moleculares de un compuesto. [6]

El enfoque de Top-Down el proceso va al revés y las estructuras mayores pasan a menores reduciendo el tamaño a la nano escala, manteniendo siempre sus propiedades originales sin. [5]

3.3 Nanotecnología y hormigón

Los beneficios ofrecidos de la nanotecnologías es quizás la investigación más activa casi en todas las ciencias e industrias. Para la industria de la construcción, como el hormigón es probablemente el material más utilizado ha sido requerido mejorar su calidad.[7]

El hormigón es un material compuesto, nano-estructurado y multi-fásico. Se forma parte de una fase amorfa de cristales de tamaño micrométrico, y agua. Esta fase amorfa C-S-H (Silicato Cálcico Hidrato) es prácticamente el pegamento que mantiene unido el hormigón. [8]

El porqué, de la aplicación de la nanotecnología en el hormigón se encuentra en los siguientes puntos: [7]

- Mejora las propiedades mecánicas del material
- Capacidad de controlar y manipular la materia en su escala atómica. (Reacción Álcali-Sílice)
- Eficiencia en coste
- Minimiza los tiempos de ajuste
- Mantiene un bajo nivel de la contaminación ambiental[7]

La nano modificación del hormigón, como es un proceso que se desarrolla rápidamente los últimos años, y en combinación con la síntesis y la manipulación del material a la escala nano ha ofrecido la posibilidad para el desarrollo de nuevos aditivos de cemento como nuevos superplastificantes, nano-partículas o nano-refuerzos. [5] Los principales aditivos basados en nano-partículas o nanorefuerzos son:[8]

- nano-sílice (nano-SiO₂)
- nano-óxido de titanio (nano-TiO₂)
- nano-hierro (nano-Fe₂O₃)
- nano-alúmina (nano-Al₂O₃)
- partículas de nanoarcilla
- nanotubos / nanofibras (CNT / CNF)

Las nanopartículas son partículas de una materia en tamaño entre 1-100 nm.

Además, métodos para la hibridación y el injerto de moléculas permiten la manipulación directa de la estructura de las fases de cemento y así pueden ser efectivas en una estrategia de **Bottom-Up**, controlando las propiedades existentes del hormigón y generando nuevas funciones y propiedades que aun no están disponibles. [5]

La aplicación de la nanotecnología en el hormigón, principalmente en forma de nano-aditivos ha demostrado hasta hoy tanto sus ventajas mecánicas como medioambientales pero con el ritmo que lleva el desarrollo de las investigaciones es muy comprometido para el futuro en el sector.

3.4 Nanotecnología y Recubrimientos

La nanotecnología en la construcción aparte de actuar en los materiales basados en cemento, tiene también una gran variedad de aplicaciones en los recubrimientos de superficies dándoles así nuevas propiedades innovadoras.

Actualmente, los Nano-Recubrimientos son recubrimientos sólidos-líquidos, compuestos por partículas extremadamente pequeñas y generan una capa de protección de superficies en la edificación, como maderas, piedra, vidrio, cerámicas, metales, morteros entre muchos otros materiales. Debido a las características que poseen estas aplicaciones en los recubrimientos se ha demostrado que son una excelente opción para protección superficial contra, humedad, desgaste, fuego, corrosión, grafiti etc., así que hoy en día están disponibles nano-recubrimientos, hidrofóbicos, hidrofílicos, descontaminantes, auto-limpiables, anti-grafiti, anti-Corrosión, fotovoltaicos entre otros. [9]

Las nano-partículas que principalmente se utilizan para la creación de nano-recubrimientos son de dióxido de titanio porque actúan como catalizador generando efecto fotocatalítico lo cual se consigue eliminar la contaminación atmosférica por los NOx , SOx, COVs y otras sustancias orgánicas. Además con este cambio de las propiedades superficiales se consiguen muchas de las propiedades indicadas anteriormente. Otros tipos de nano-partículas pueden ser de Dióxido de silicio, Óxido de hierro y Óxido de zinc.

3.5 Riesgos del uso de nano-tecnología

Aparte del desarrollo, las propiedades y las innovaciones que ofrece el uso de la nanotecnología en el sector de la construcción los últimos años, cada vez mas estudios presentan también los peligros que este tipo de materiales pueden contener para la salud humana y ambiental. Se ha demostrado que la peligrosidad propia de los nano-materiales está relacionada fundamentalmente con su tamaño, forma, estructura, solubilidad y estado de agregación o de aglomeración y con el nivel de exposición a estos nano-materiales.[10]

Respecto a estos peligros se han realizado varios estudios sobre su evaluación y a continuación sobre la evaluación de posibles medidas preventivas que quizás fuesen necesarias.[10]

4. Aplicaciones de nano-tecnología en elementos con base cemento

Antes de tratar como la nanotecnología se aplica en los materiales cementosos tendríamos que dar una definición sobre de lo que es cemento, como se produce y que tipos existen en el mercado actual.

El cemento es un conglomerante hidráulico, un material de naturaleza inorgánica que está formado de una mezcla de materiales calizos y arcillosos que fundamentalmente son Silicato tricálcico, Silicato dicálcico, Aluminato tricálcico, Ferritoaluminato tetracálcico. Esta mezcla se llama clinker [11] y cuando se amasa con agua, forma una pasta que fragua y endurece mediante las reacciones de hidrólisis e hidratación. (fig. 1)[12]

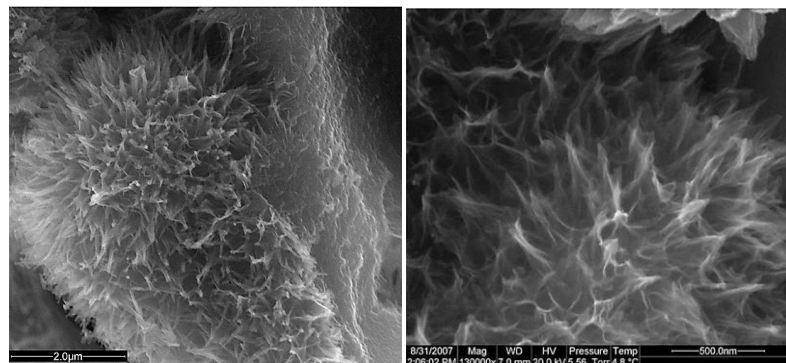


Fig. 1: Fase de Hidratación del Cemento[13]

Durante la Hidratación se producen una serie de reacciones químicas que darán lugar con el transcurso del tiempo a la formación de una estructura solida [11]



Así se producen hidratados mecánicamente resistentes incluso bajo el agua. [12]

Según la norma UNE-EN 197-1:2000 el cemento está clasificado en 5 tipos principales como ellos se presentan en la siguiente (tabla 1).[14]La clasificación se basa en los diferentes componentes de cemento que se dosifican distintas dosis dando origen a los distintos tipos de cementos.[12]

Tipos de cemento	Denominaciones	Designaciones
I	Cemento Portland	CEM I
II	Cemento Portland con adiciones	CEM II
III	Cemento Portland con escorias de horno alto	CEM III
IV	Cemento puzolánico	CEM IV
V	Cemento compuesto	CEM V

Tabla 1: Tipos de cemento[14]

4.1 El Hormigón

En la construcción, el material más utilizado con base cemento es **el hormigón**. El hormigón es una mezcla de cemento, áridos (arena y grava), agua y algunos aditivos en proporcionalmente distintas proporciones. Aun que no es tan fuerte ni tan resistente como el acero, lo que lo hace lo más utilizado en la construcción son propiedades como resistencia al agua, facilidad de fabricar en formas distintas y bajo coste.[14]

Las propiedades del hormigón existen, y los mecanismos de degradación ocurren a través de la longitud múltiple de escalas (nano a micro a macro) donde las propiedades de cada escala se generan de los de la siguiente escala más pequeña. La fase amorfa, silicato de calcio-hidrato (C-S-H) es el "pegamento" que mantiene el hormigón unido y es en sí mismo un nanomaterial. Por ello que algunos autores reconocen que el C-S-H se encuentra en la escala de los nanomateriales.[5]

Hoy en día, la nano-ingeniería, o nano-modificación, en el hormigón es un campo que emerge rápidamente. La síntesis y el ensamblaje de materiales en la escala de nanómetros, la propiedades que generan, ofrecen la posibilidad de desarrollar nuevos aditivos de cemento, como nuevos **superplastificantes, nanopartículas o nanorefuerzos**. Las metodologías para la hibridación y el injerto de moléculas permiten la manipulación directa de la estructura fundamental de las fases del cemento. Estas técnicas se pueden utilizar efectivamente en un ascendente bottom-up para controlar las propiedades del hormigón, el rendimiento y los procesos de degradación de un hormigón superior y para proporcionar al material nuevas funciones y propiedades inteligentes que no están disponibles actualmente. [5]

La modificación de hormigón a nanoescala puede tener lugar en una o en más de las siguientes tres fases: [5]

- **en la fase sólida**
- **en la fase líquida**
- **en las interfaces**, (incluidas las interfaces líquido sólido y sólido sólido).

4.2 Modificación por medio de adición de nanopartículas

Las nanopartículas son un aspecto de la nanotecnología, que a menudo se discuten en relación con los materiales cementosos. De hecho, la mayoría de las aplicaciones actuales de la nanotecnología se limitan al uso de nanomateriales pasivos de "primera generación". [15] [15b] Las partículas de tamaño nanométrico tienen una alta relación de área de superficie a volumen (Fig.2), proporcionando el potencial de una tremenda reactividad química[5]

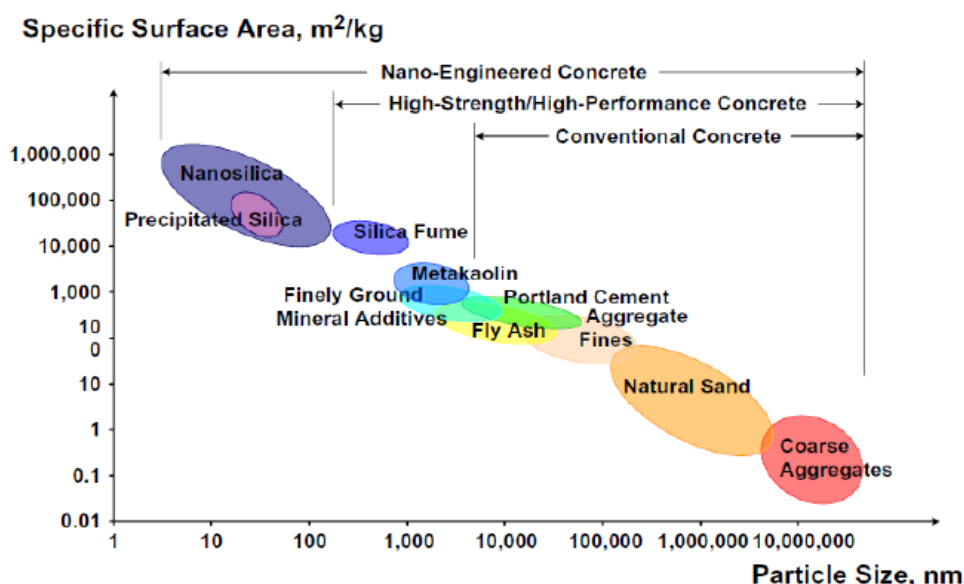


Fig. 2 :Tamaño de nano-partículas y área específica superficial[5]

La adición de Nano partículas al cemento interviene en la velocidad de hidratación del cemento favoreciendo su resistencia y sus propiedades mecánica, incrementando así la cantidad de C-S-H evitando una posible posterior degradación. [16]

El problema más importante para todas las nanopartículas es la dispersión efectiva. Aunque es particularmente significativo en altas cargas, incluso bajas cargas experimentan problemas con la autoagregación, lo que reduce los beneficios de su pequeño tamaño y crea bolsas sin reaccionar que conducen a un potencial de concentración de tensiones en el material.

La mayor parte del trabajo hasta ahora con nanopartículas ha sido con nano-sílice (**nano-SiO₂**) y óxido de nano-titanio (**nano-TiO₂**). [5]

Existen algunos estudios sobre la incorporación de nano-hierro (**nano-Fe₂O₃**), nano-alúmina (**nano-Al₂O₃**) y partículas de **nanocarcilla**. Además, un número limitado de investigaciones se refiere a la fabricación de partículas de cemento de tamaño nanométrico y al desarrollo de nanobinders. [5]

4.2.1 Nano-SiO₂



Fig. 3 Nanosilice en polvo[16]

La nano sílice (NS) son nano partículas (1–500 nm) de sílice amorfa [14]. Se ha demostrado que su adición al hormigón mejora la trabajabilidad, la resistencia del hormigón y la durabilidad ya que aumenta la resistencia a la penetración de agua y controla la lixiviación del calcio, que está relacionado con diversos tipos de degradación del hormigón. Además, se demostró que la nano sílice acelera las reacciones de hidratación tanto del C3S como de un mortero de ceniza como resultado de la superficie grande y altamente reactiva de las nanopartículas. Se encontró además que la nano sílice es más eficaz para mejorar la resistencia que el humo de sílice. [5]

Se observó que la adición de nano-SiO₂ al 10% con agentes dispersantes aumenta la resistencia a la compresión de los morteros de cemento a 28 días hasta en un 26%, en comparación con solo un 10% con la adición de 15% de humo de sílice. Incluso se observó que la adición de pequeñas cantidades (0,25%) de nano-SiO₂ aumentaba la resistencia, mejorando la resistencia a la compresión a los 28 días en un 10% y la resistencia a la flexión en un 25%. Se observó que los resultados obtenidos dependían de la ruta de producción y las condiciones de síntesis de la nano sílice (por ejemplo, las relaciones molares de los reactivos, el tipo de medio de reacción y la duración de la reacción para el método sol-gel). Asimismo la dispersión de la nano sílice en la pasta juega un papel importante. La nanosílice no solo se comportó como un relleno para mejorar la microestructura, sino también como un activador para promover las reacciones puzolánicas. [5]

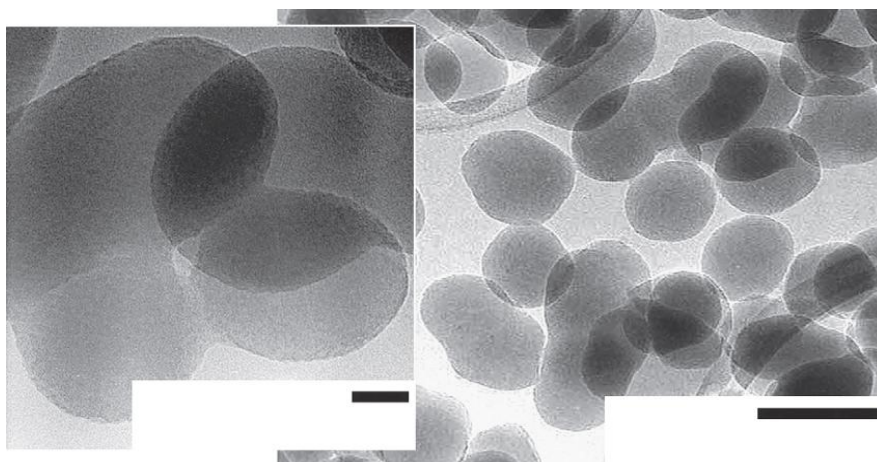


Fig.4 Partículas de nano-Sílice esféricas en distribución uniforme [5]

4.2.2 Nano-Fe₂O₃



Se ha encontrado que el Nano-Fe₂O₃ proporciona al hormigón capacidades de auto-detección y mejora su resistencia a la compresión y a la flexión. Se encontró que la resistencia eléctrica volumétrica del mortero de cemento con nano-Fe₂O₃ cambia con la carga aplicada, lo que demuestra que el mortero con nano-Fe₂O₃ podría detectar su propio esfuerzo de compresión. Dichas capacidades de detección son valiosas para la monitorización de la salud estructural en tiempo real y para la construcción de estructuras inteligentes ya que no implican el uso de sensores integrados o conectados [5]

Fig. 5 Nano-Fe₂O₃ en polvo[16]

4.2.3 Nano-Al₂O₃



Se ha demostrado que Nano-Al₂O₃ aumenta significativamente el módulo de elasticidad (hasta 143% en una dosificación del 5%) pero tiene un efecto limitado sobre la resistencia a la compresión, y no se han observado mejoras en otras propiedades.[5]

Fig. 6 Nano-Al₂O₃ en polvo [16]

4.3 Aditivos Nano para materiales de cemento existentes en el mercado. (Tablas 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5)

Para poder tener una idea más completa sobre las aplicaciones de la nanotecnología en los materiales cementosos tendríamos que declarar que de lo que hemos presentado antes es investigación y teoría y que es realidad hoy el día. Por ello se realizó una investigación del mercado tanto de Catalunya como de toda España y algo de Europa, para poder ubicar nano-aditivos que estén disponibles comercialmente. Se han encontrado varios tipos de nano-aditivos y con diferentes efectos cada uno. En las tablas siguientes se presentan unos casos muy característicos de los nano-aditivos que existen en el mercado y realmente se usan en los elementos de hormigón. Las tablas a parte de los nombres de los productos y sus fabricantes contienen una descripción de cómo actúa cada aditivo en el hormigón dependiendo las nano-partículas que lleva. Además se presentan los principales beneficios que se generan con cada nano-adición y el campo de aplicación en la construcción en el que más se usan.

Nombre	Fabricante	Tipo de Producto	Mecanismo de Acción	Beneficios Ofrecidos	Campo de Aplicacion en la consruccion
FastKick 111	MC	Aditivo	FastKick 111 Se basa en la incorporación en el hormigón fresco de núcleos de cristalización de composición similar a las fases hidratadas de cemento. Estos núcleos favorecen la rápida formación de hidratos, acelerando de manera muy efectiva el desarrollo de resistencias a edades muy tempranas (5-10h), manteniendo e incluso mejorando las resistencias a largo plazo y ofreciendo además efecto plastificante y cohesionante.[17]	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora las resistencias iniciales -Aumenta la fluidez -Aumento en la resistencia a compresión a las 8 horas -Posibilidad de reducción de agua[17] 	<ul style="list-style-type: none"> -Industria de prefabricación -Hormigón premezclado de alta resistencia -Hormigonado en el periodo de invierno.[18]
MASTER X-Seed	BASF	Aditivo	Master X-Seed es un aditivo líquido de nanopartículas suspendidas con base de aluminio. Sirve como un activador de la hidratación del hormigón durante su fabricación. La adición de las nanopartículas, cuales actúan como núcleo de cristalización y desarrollan la producción del gel CSH en la hidratación, hace el proceso mucho más rápido.[19] Así se aumenta la resistencia inicial, y la productividad del hormigón sin afectar las restantes características del rendimiento.[20]	<ul style="list-style-type: none"> -Generación rápida de resistencias iniciales sin afectar las resistencias restantes -Producción de hormigón económicamente rentable. -Durabilidad a largo plazo de las estructuras de hormigón. -Ahorro en emisiones de CO₂[19] 	<ul style="list-style-type: none"> -Prefabricados de estructuras de hormigón -Revestimiento in situ en proyectos de túneles - Colocación de hormigón en condiciones invernales[19]

Tabla 2.1: Aditivos Nano para materiales de cemento existentes en el mercado

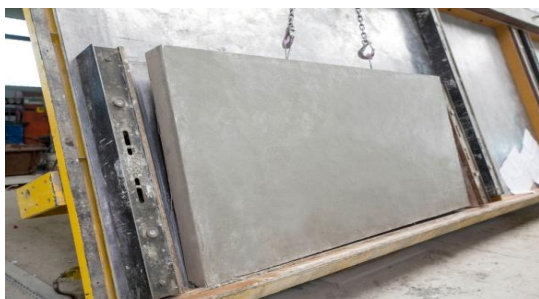


Fig. 7 Prefabricados de estructuras de hormigón[21]



Fig. 8 Revestimiento in situ en proyectos de túneles.[19]



Fig. 9 Colocación de hormigón en condiciones invernales[19]

Nombre	Fabricante	Tipo de Producto	Mecanismo de Acción	Beneficios Ofrecidos	Campo de Aplicacion en la consruccion
Centrilit NC	MC	Aditivo	Centrilit NC es un adición puzolanica basada en aluminosilicato amorfo con estructura en placas para materiales con base cemento (hormigón, mortero etc). Aparece en el mercado en dos formas, o como una suspensión o como un fino polvo, los cuales ambos se mezclan dentro de la masa de hormigón. Está basado en nano partículas de aluminio amorfo y dependiendo el tamaño de la partícula rellena respectivamente las cavidades de la pasta de cemento durante la hidratación.[21]	<ul style="list-style-type: none"> -Aumenta la homogeneidad y la densidad del hormigón. -Reduce la migración de cloruros. -Incrementa la resistencia química. -Aumenta la resistencia a la abrasión[21] 	<ul style="list-style-type: none"> -Elementos de hormigón prefabricado. -Hormigones de altas prestaciones. -Hormigones de alta resistencia. -Hormigones con alta resistencia química. -Tuberías de hormigón. -Hormigón proyectado.[21]

Tabla 2.2: Aditivos Nano para materiales de cemento existentes en el mercado

Nombre	Fabricante	Tipo de Producto	Mecanismo de Acción	Beneficios Ofrecidos	Campo de Aplicacion en la construcion
Centrilit Fume SX	MC	Aditivo	Centrilit Fume SX es un aditivo para hormigón basado en nano partículas 50 a 100 veces más pequeñas que las de hormigón $(0.1\mu\text{m})$ las cuales dependiendo el tamaño de la partícula rellena respectivamente las cavidades de la pasta de cemento. Durante el proceso de la hidratación, este aditivo reacciona con la cal libre del cemento al compuesto consistente y durable hidro-silicato de calcio. Esto crea un hormigón denso. Este gran incremento de la resistencia del hormigón, junto con una gran densidad consigue una gran protección frente a la corrosión.[22]	<ul style="list-style-type: none"> -Aumenta la resistencia y la densidad del hormigón. -Mejora la ratio de la resistencia -Incrementa la resistencia química -Aumenta la resistencia a la corrosión[22] 	<ul style="list-style-type: none"> -Elementos de hormigón prefabricado. -Hormigones de altas prestaciones. -Hormigones de alta resistencia. -Hormigones con alta resistencia química.[22]
MasterRoc MS 685	BASF	Aditivo	MasterRoc MS 685 es un nano aditivo para hormigón. Es una mezcla líquida basada en suspensión de nanosílice amorfa. La reacción de estas nanopartículas empieza tan pronto como se mete una posible combinación con cenizas volante puede hacer esta reacción mucho más efectiva. Esta mezcla proporciona mejor cohesión y menor porosidad.[23]	<ul style="list-style-type: none"> -Mejora la cohesión. -Reduce la presión de bombeo. -Reduce la porosidad y la permeabilidad. -Corrige el defecto de finos en la curva granulométrica. -Mejora el acabado superficial [23] 	<ul style="list-style-type: none"> -Hormigón bombeado. -Hormigón expuesto ante aguas blandas. . -Hormigón de altas prestaciones. -Hormigón proyectado. -Morteros de inyección. -Hormigón autocompactante.[23]

Tabla 2.3: Aditivos Nano para materiales de cemento existentes en el mercado

Nombre	Fabricante	Tipo de Producto	Mecanismo de Acción	Beneficios Ofrecidos	Campo de Aplicacion en la consruccion
SurfaMix C	NanoPhos	Aditivo	SurfaMix es un aditivo con base de agua para materiales cementosos. Las nanoparticulas que contiene controlan el proceso de hidratación y asi reducen el encogimiento y la formacion de grietas o capilares absorbentes de agua. También promueve la adhesión y la plasticidad de la mezcla durante la aplicación.[24]	<ul style="list-style-type: none"> -Aumenta (duplica) la adhesión -Promueve el pegado -Mejora la trabajabilidad -Previene la aparición de grietas[24] 	<ul style="list-style-type: none"> -Yeso y Estucos -Acabados exteriores e interiores en albañilería -Mortero/Base de cemento[24]
Nano Fluid PR	APLIKA	Aditivo	Nano Fluid PR es un aditivo para hormigón prefabricado que contiene nano partículas de nano sílice y otros aditivos polimericos. Esta combinación es de alta actividad y con gran capacidad reductora de agua. [25]	<ul style="list-style-type: none"> -Gran poder plastificante y reductor de agua -Incremento de la resistencia mecánica inicial y final -Mejora las propiedades geológicas de la pasta de cemento -No produce retrasos anómalos de fraguado[25] 	Hormigón Prefabricado[25]

Tabla 2.4: Aditivos Nano para materiales de cemento existentes en el mercado

Nombre	Fabricante	Tipo de Producto	Mecanismo de Acción	Beneficios Ofrecidos	Campo de Aplicacion en la consruccion
Nano Silice CROM CS-5	CROMCRET	Aditivo	Nano Sílice CROM CS-5 es un aditivo en forma líquida para hormigones, basado en una sílice coloidal inorgánica, altamente reactiva, estabilizada en medio acuoso. Se mezcla en la masa del hormigón como ultimo de todos los aditivos agregados. Es especialmente compatible con reductores de agua de alto rango basados en policarboxilato.[26]	<ul style="list-style-type: none"> -Hormigón de mayor homogeneidad -Mejora la bombeabilidad -Incrementa resistencias[26] 	<ul style="list-style-type: none"> -Se recomienda en hormigones de alta fluidez, hormigón bombeado, hormigón pretensado y hormigón proyectado[26]
Aditivo NEHO	E – NANO NEHO S.L.	Aditivo	El aditivo NEHO es un aditivo para cementos hidrófobos, mejorando la compactación y regulando las propiedades capilares de los hormigones. Además alcanza una reducción duradera de la absorción de agua. El aditivo se aplica al agua del amasado del hormigón.[27]	<ul style="list-style-type: none"> -Agente hidrófobo -Protección contra la eflorescencia de la cal -Difusor de vapor -Alta resistencia a los álcalis -Resistente al hielo ya la descongelación -Extremadamente resistente a la intemperie[27] 	<ul style="list-style-type: none"> -Hormigones normales y prefabricados -Morteros -Piedras y Ceramica[27]

Tabla 2.5: Aditivos Nano para materiales de cemento existentes en el mercado

4.4 Nano-TiO₂



Fig. 10 Nano-TiO₂ en polvo

El Oxido de titanio o TiO₂ es un mineral natural. El Nano-TiO₂ es un aditivo material en nano-partículas de oxido de titanio y justo con el nano-SiO₂ son los aditivos más utilizados en los materiales de construcción. Nano-TiO₂ se ha demostrado ser muy eficaz para la autolimpieza del hormigón y proporciona el beneficio adicional de ayudar a limpiar el medio ambiente. El hormigón que contiene nano-TiO₂ actúa desencadenando una degradación fotocatalítica de contaminantes, como NO_x, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles (COV), clorofenoles y aldehídos procedentes de emisiones industriales y de vehículos. Algunos fabricantes ya están produciendo productos de hormigón "autolimpiantes" y "desinfectantes" para su uso en fachadas de edificios y en materiales de pavimentación para carreteras y se han utilizado en Europa y Japón (por ejemplo, la Iglesia del Jubileo en Roma, Italia, un tramo de carreteras de 230 m de largo fuera de Milán, Italia). A parte de impartir propiedades autolimpiantes, algunos estudios han demostrado que el nano-TiO₂ puede acelerar la hidratación temprana del cemento Portland, mejorar las resistencias a la compresión y la flexión y mejorar la resistencia a la abrasión del hormigón. Sin embargo, también se encontró que el envejecimiento debido a la carbonatación puede dar como resultado la pérdida de la eficacia catalítica. [5]

4.5 Fotocatálisis. «La fotosíntesis de las superficies urbanas».

La fotocatálisis, así como la fotosíntesis natural utiliza la luz solar para transformar el dióxido de carbono a materia orgánica, consigue eliminar otros contaminantes atmosféricos como los NO_x, SO_x, COVs y otras sustancias orgánicas, a través de un proceso activado por la energía solar. [28]

En otras palabras la fotocatálisis es un proceso foto-químico lo cual trata de limpiar el aire de sustancias contaminantes producidas tanto por los vehículos como por las industrias. Este efecto aplicado en los materiales de construcción utilizados en las superficies tanto verticales como horizontales en los edificios y en las zonas urbanas, mejora la calidad del aire que respiramos. Para la producción de esta reacción asociada a la fotocatálisis es necesario por un lado la aplicación de un foto-catalizador en el material, y por otro, la presencia de radiación solar. El fotocatalizador más comúnmente utilizado es el dióxido de Titanio (TiO₂) y productos derivados de él. [29]

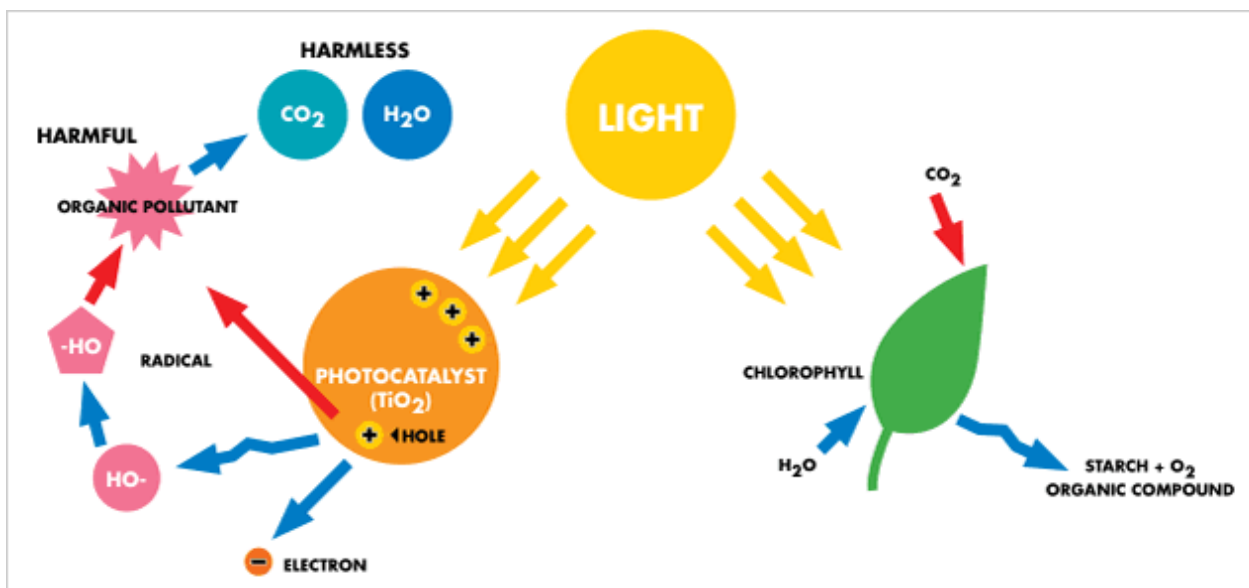


Fig.11 Proceso de fotocatalisis[29]

El dióxido de titanio (TiO_2), en presencia de luz solar o artificial, genera propiedades descontaminantes y autolimpiantes. En esas condiciones, la superficie transforma moléculas contaminantes en suspensión, lo cual los hace fácilmente evaluables por la lluvia. [28]

Los beneficios a los que conlleva la aplicación de elementos fotocatalíticos en la construcción conllevar son varios. A parte del efecto descontaminante, mediante el uso de sustancias fotocatalíticas se pueden disminuir notablemente los costes de mantenimiento y limpieza ya que disminuyen la acumulación de suciedad en su superficie. Además debido a su carácter antibacteriano y organoléptico se minimizan los malos olores. Los elementos constructivos donde mayoritariamente se aplican estos efectos son los pavimentos, las fachadas, las cubiertas y en general la mayoría de los elementos urbanos. [28]

Asimismo el dióxido de titanio se utiliza ampliamente en superficies acristaladas escurriendo mejor las aguas y por tanto contener menos suciedad acumulada, lo cual genera importantes ahorros a los costes acumulados a la conservación de los edificios. [28]

En las grandes ciudades como Barcelona o Madrid donde hay varias zonas que los niveles de contaminación son mucho mayores que los permitidos han se ha comenzado a emitir licitaciones públicas para la aplicación de soluciones fotocatalíticas. En Madrid está prevista la ejecución de pavimentos fotocatalíticos en más de 22.000 m² y otros 3.000 m² en revestimiento de túneles y en Barcelona el Ayuntamiento va a instalar más de 20.000 m² de pavimentos en las zonas peatonales de la Avenida Diagonal. [28]

La Asociación Ibérica de Fotocatálisis (AIF)

La Asociación Ibérica de Fotocatálisis (AIF) fomenta la fotocatalisis en España agrupando a todas las empresas que aportan materiales de la construcción fotocatalíticos, con el objetivo de imponer la idea de La Isla Fotocatalítica dentro de las grandes urbes contaminadas. [28]

Islas fotocatalíticas

Con el concepto Islas Fotocatalíticas, se refiere una zona urbana donde todas las superficies, (horizontales y verticales) han sido tratadas con esta tecnología y generando el efecto fotocatalítico tengan como objetivo de limpiar el aire. La islas fotocatalíticas pueden formar parte o sobre elementos estructurales existente, a nivel de mantenimiento ó mucho más sobre nuevas urbanizaciones. Se crea así una especie de eco-barrio o calle descontaminante, conceptos relacionados con smart cities, donde la idea es crear espacios que hacen las ciudades más eficientes. [28]



Fig.12 Fotocatálisis en zonas urbanas

4.6 Nano-Cementos foto-catalíticos existentes en el mercado. (Tablas 3.1 y 3.2)

En las tablas siguientes se presentan ejemplos de cementos foto-catalíticos basados en adición de nano-partículas de TiO_2 . Se ha realizado investigación en el mercado tanto de Catalunya como de toda España y algo de Europa, y se eligieron los casos más característicos, más desarrollados y más utilizados los últimos años en la industria de la construcción. Además, la tablas contienen una descripción de los principales beneficios de los productos y el campo de la aplicación en la construcción que más se usan.

Nombre	Fabricante	Tipo de Producto	Mecanismo de Acción	Beneficios Ofrecidos	Campo de Aplicacion en la consruccion
TX Arca	Italcementi Group TX Active (Italia)	Cemento	TX Arca es un cemento con propiedades fotocatalíticas principalmente debidas al uso de dióxido de titanio. El efecto de fotocatalisis elimina los componentes orgánicos descomponiéndolos en agua (H_2O) y dióxido de carbono (CO_2). Los inorgánicos se disuelven (destrucción parcial) y son eliminados por el agua de la lluvia o de riego.[30] Así se genera un efecto autolimpiable lo cual mantienen el aspecto estético inicial de las obras fabricadas con ello.[31]	-Antibacteriano -Autolimpiable[30]	Obra arquitectónicas de prestigio, de alta calidad de materiales que normalmente son de alta importancia.[31]
TX Arla	Italcementi Group TX Active (Italia)	Cemento	TX Arca es un cemento con propiedades fotocatalíticas principalmente debidas al uso de dióxido de titanio. El efecto fotocatalitico contribuye a la reducción de la contaminación atmosférica principalmente sobre los óxidos de nitrógeno NO_x , transformándolos en sales solubles de nitrato de calcio que son eliminados por el agua de lluvia o de riego y los COV se transforman en agua o dióxido de carbono.[30]	-Descontaminante	-Pavimentos de hormigón -Pavimentos de adoquines prefabricados -Revestimientos de pavimentos y calles -Pinturas para las señales de tráfico -Tejas de hormigón, en estructuras verticales -Morteros de revestimiento -Pinturas de cemento -Paneles prefabricados[31]

Tabla 3.1: Nano-Cementos foto-catalíticos existentes en el mercado



Fig.13 Iglesia Dives in Misericordia (Roma) de Richard Meier primera aplicación de TX ARIA[30]



Fig.14 Iglesia de Lesu, San Sebastian, España Arquitecto: Rafael Moneo[30]

Nombre	Fabricante	Tipo de Producto	Mecanismo de Acción	Beneficios Ofrecidos	Campo de Aplicacion en la consruccion
Air-Clean	BREINCO (España)	Cemento	Air-Clean es el nombre comercial que ha dado la empresa a sus cementos que contienen nanoparticulas de dióxido de titanio en forma anatasa. Debido a esto y la luz del sol se genera un efecto fotocatalitico lo cual tiene propiedades de reducir la contaminación del aire, provocando una descomposición de los óxidos contaminantes (NOx) en subproductos que se evacuan por las aguas pluviales.[32]	-Descontaminante	-Pavimentos urbanos -Revestimientos asfálticos para tráfico rodado - Baldosas y adoquines - Fachadas y cubiertas de edificios - Bordillos, - Vados[33]
TioCem TX	HEIDELBERGCement	Cemento	TioCem TX Active es un cemento de escoria Portland lo cual debido al uso de dióxido de titanio nanocristalino, tiene propiedades fotocatalíticas. El óxido de titanio bajo la influencia de la luz del sol , aumenta la velocidad de una reacción química la cual reduce los óxidos nítricos contenidos en el aire transformandolos en nitrato inofensivo (NO ₃ ⁻) en la superficie del hormigón. Así se mantiene limpio el aire de la ciudad. [34]	-Descontaminante	-Piedras de pavimento -Elementos de revestimiento de fachada -Superficies de calle, carreteras -Cubierta de hormigón[34]

Tabla 3.2: Nano-Cementos foto-catalíticos existentes en el mercado



Fig. 15 Pavimento fotocatalítico en el puerto náutico de L´estartit , Girona[33]



Fig.16 CAR Sant Cugat, Barcelona, Diciembre 2011 1500 m2
pavimento llosa vulcano air-clean@[33]



Fig.17 Plaza Can Ros, Barcelona, Agosto 2010 2800 m2
pavimento llosa vulcano air-clean@[33]

4.7 Reducción de las partículas de cemento a nano-polvo de cemento

Se han propuesto partículas y nanopartículas de cemento y nanobinders como una manera de mejorar el rendimiento del cemento al tiempo que se reducen las emisiones de carbono. Se presentan dos formas de crear partículas de cemento de tamaño nanométrico: [5]

1. **molienda de alta energía del clinker convencional de cemento Portland (enfoque descendente)**
2. **síntesis química (Bottom up).**

Las pastas de cemento hechas con partículas de cemento de tamaño nanométrico han mostrado tiempos de fraguado más rápidos y un aumento en la resistencia a la compresión temprana en comparación con las pastas preparadas con cemento común comercialmente disponible. [5]

Recientemente, se ha propuesto el concepto de un **nanobinder**. Este concepto implica la activación mecanoquímica que se obtiene mediante el cemento entre molienda con aditivos minerales secos en un molino de bolas. Se ha demostrado que la modificación mecanoquímica del cemento con altos volúmenes de escoria de alto horno aumenta la resistencia a la compresión hasta en un 62%. Las partículas de nanoarcilla se han mostrado prometedoras en la mejora del rendimiento mecánico, la resistencia a la penetración del cloruro y las propiedades autocompactantes del hormigón y en la reducción de la permeabilidad y la contracción. [5]



Fig.18 Arcilla Procesada

La arcilla y las propiedades de la arcilla que son importantes como aditivos para el cemento existen en la nanoescala. Las partículas de arcillas individuales y naturales son de tamaño micrométrico y submicrométrico, y la estructura de base de la arcilla está compuesta por capas cristalinas de filosilicatos de aluminio con espesores del orden de ca. 1 nm. Las capas exfoliadas son verdaderas nanopartículas. El efecto de la arcilla en el cemento no es un tema nuevo y sin embargo, recientemente ha habido un resurgimiento centrado en las posibilidades de la nano-ingeniería de las arcillas. [5] ²

Debido a que las partículas de arcilla son típicamente altamente hidrofílicas, el control de los requerimientos de agua en los compuestos de arcilla y cemento es importante. Además, se observó que las arcillas esmectíticas nanométricas no modificadas actúan como agentes de nucleación para C-S-H y para modificar la estructura de C-S-H. [5]

4.8 Hibridación de C-S-H

La modificación de la estructura de C-S-H a escala nanométrica para crear nanocompuestos híbridos, orgánicos y cementosos ha recibido atención muy recientemente debido al interés en estructuras de hormigón más sostenibles. [5]

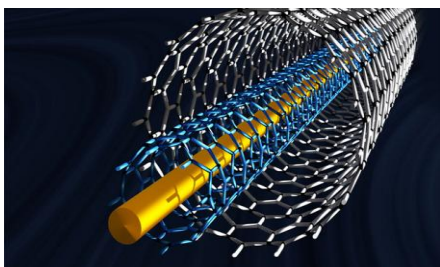
La estructura estratificada y la propensión a tener defectos estructurales en las cadenas de silicato (tetraedro puente que falta) de C-S-H ofrecen el potencial para la manipulación creativa mediante la inserción de una variedad de moléculas orgánicas en la estructura básica C-S-H. Se han propuesto tres maneras para hibridar o incorporar "moléculas invitadas" en C-S-H:

- La primera intercala moléculas orgánicas en la capa C-S-H.
- En la segunda, las "moléculas invitadas" se unen covalentemente a la estructura del silicato.
- La tercera implica injertar las "moléculas invitadas" en los sitios de defectos de la cadena de silicato.

Estos esquemas ya son fuente de debate, aunque hay relativamente muy pocas publicaciones disponibles en la literatura. Hasta el día de hoy, la atención se ha centrado en la síntesis de C-S-H híbrido y orgánico. Queda mucho por investigar para evaluar los mecanismos de hidratación, el rendimiento mecánico y la durabilidad a largo plazo de estos nuevos híbridos. [5]

4.9 Incorporación de Nano-Refuerzos: NanoTubos y NanoFibras

Los nanotubos / nanofibras de carbono (CNT / CNF) son los candidatos más potenciales para su uso como nanorefuerzos en materiales a base de cemento. Los CNT / CNF presentan una resistencia extraordinaria con módulos de elasticidad respecto al TPa, resistencia a la tracción en el rango de GPa, y tienen propiedades electrónicas y químicas únicas. Los CNT / CNF, por lo tanto, parecen estar entre los nanomateriales más prometedores para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales basados en cemento y su resistencia a la propagación de grietas mientras que proporcionan propiedades tan novedosas como el blindaje del campo electromagnético y la autodetección. [5]



Los nanotubos de carbono (CNTS) están constituidos por redes hexagonales de carbono curvadas y cerradas, que forman tubos de carbono de tamaño nanométrico. Podemos diferenciar entre nanotubos monocapa (un sólo tubo) y multicapa (varios tubos, uno dentro de otro). Estas estructuras se caracterizan por ser ligeras, huecas y porosas, con alta resistencia mecánica. [36]

Fig.19 Nanotubos de Carbono[35]

Las nanofibras de carbono (CNFS) son un tipo de material sintético de carbono nanoestructurado, de naturaleza similar al grafito, con ventajosas propiedades para diversos campos de aplicación [38]

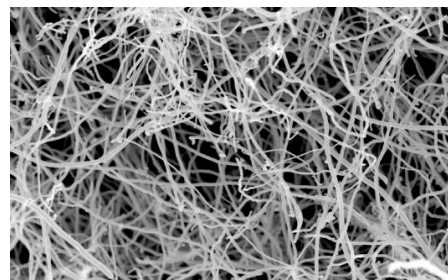


Fig.20 Nanofibras de Carbono[37]

Los CNT de monocapa (SWCNT), los CNT de varias multicapa (MWCNT) y los CNF son materiales altamente estructurados basados en anillos de grafito con relaciones de aspecto muy grandes (de 1000 o más) y áreas de superficie muy elevadas. [5]

Los SWCNT son cilindros de grafito único y los MWCNT son cilindros concéntricos de grafito múltiples dispuestos coaxialmente alrededor de un núcleo hueco. A diferencia de los CNT, los CNF presentan numerosos planos de bordes expuestos a lo largo de la superficie que constituyen sitios potenciales para una interacción química o física ventajosa. En comparación con los CNT, los CNFs de vapor aumentados tienen un costo de producción más bajo (alrededor de 100 veces menor que los SWCNT) y son adecuados para la producción en masa. Mientras, CNT / CNF se han estudiado ampliamente en materiales compuestos poliméricos, su uso en el cemento hasta hoy ha sido limitado. La mayoría de los esfuerzos de investigación se han centrado en CNT en comparación con CNF y se han realizado en pastas de cemento. Solo algunas investigaciones se han ocupado de la incorporación de CNT en el mortero. Uno de los principales desafíos es la adecuada dispersión de CNT / CNF en pasta de cemento, en parte debido a su alta hidrofobicidad y en parte debido a su fuerte autoatracción. La incorporación de las propiedades mecánicas únicas de CNT / CNF en compuestos de cemento ha demostrado ser bastante compleja y hasta hoy se han obtenido resultados mixtos. Sin embargo, se ha demostrado una buena interacción entre los CNT / CNF y las fases del cemento, lo que indica la posibilidad de uniones, de grietas y una mayor transferencia de esfuerzos. [5]

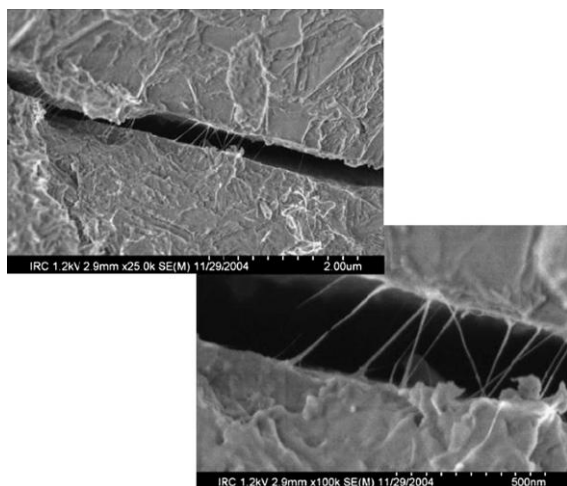


Fig. 21 Puente de grietas observado en compuestos de cemento-CNT[5]

5. Aplicaciones de la nano-tecnología en recubrimientos

Los recubrimientos nano-estructurados ofrecen un gran potencial para diversas aplicaciones debido a sus características superiores que no se encuentran generalmente en los recubrimientos tradicionales[39] y son particularmente adecuados para proteger exitosamente la superficie de varios materiales de construcción como vidrio, hormigón, caliza de arena o mármol de influencias ambientales como manchas de agua, musgo, algas así como manchas de hollín y aceite.[39] Por eso que el interés en los materiales nano-estructurados para revestimientos viene respecto a sus notables propiedades mecánicas, eléctricas, magnéticas y ópticas y las posibilidades de sintetizar materiales con propiedades físico-cíclico únicas.[39]

5.1 El uso de Nanoparticulas

Los nano-materiales en general se fabrican con al menos una dimensión de menos de 100 nm. Los nano-recubrimientos son materiales bidimensionales que se pueden producir mediante tecnologías físicas (por ejemplo, plasma, PVD), químicas (por ejemplo, CVD, sol-gel) y para la construcción mas en partículas (por ejemplo, TiO₂).[39]

Un desarrollo relativamente reciente es el uso de nanoparticulas en los revestimientos de construcción, las cuales propiedades novedosas tanto en los recubrimientos como en las pinturas.

Las nanopartículas utilizadas en la industria de recubrimientos incluyen:[39]

- Dióxido de titanio
- Dióxido de silicio
- Óxido de hierro
- Óxido de zinc

El dióxido de titanio lo cual se utiliza más que todas las nano-particulas, tiene propiedades fotocatalíticas. Por ello que se encuentra mayoritariamente en las pinturas de pared en forma nanométrica para eliminar los contaminantes orgánicos del aire ambiental. El dióxido de silicio nanoestructurado sirve principalmente como un aditivo reológico; también se usa en pinturas de pared autolimpiantes. La protección UV en revestimientos transparentes es la aplicación más importante para el óxido de hierro y el óxido de zinc a escala natural. La plata en forma de nano forma parte de las pinturas murales para hospitales y operaciones de procesamiento de alimentos, para prevenir el ataque de bacterias y otros microorganismos.[39]

Debido a las propiedades existentes a la nanoescala, los revestimientos nanoestructurados son típicamente multifuncionales, exhibiendo una o combinaciones de propiedades como por ejemplo, resistencia al rayado y a la abrasión, hidrofobicidad, hidrofiliidad, oleofobicidad, facilidad de limpieza superficial, antimicrobiano, sensor y actividad catalítica etc.[39]

Los productos novedosos con estas propiedades las cuales intervienen debido al uso de las nano-partículas son:

- Recubrimientos Hidrofóbicos
- Revestimientos Hidrofílicos
- Revestimientos Descontaminantes
- Revestimientos Auto-limpiables
- Revestimientos Antibacterianos y Antivíricos
- Revestimientos de Tratamiento de aguas
- Recubrimientos Anti-hongos
- Recubrimientos Anti-polvo
- Recubrimientos Desodorizante
- Recubrimientos Resistentes a la Radiación UV
- Recubrimientos y Vidrios Anti-Fuego
- Recubrimientos Anti-Corrosión
- Recubrimientos Anti-grafiti
- Recubrimientos de Abrasión y Anti-desgastes
- Recubrimientos Electrocrómicos
- Recubrimientos Fotovoltaicos
- Recubrimientos de Cambio de Fase

5.2 Recubrimientos hidrofílicos e hidrofóbicos

En la naturaleza podemos encontrar superficies con propiedades hidrofóbicas y hidrofílicas, características cuyas propiedades serían muy útiles para las superficies en la industria de construcción. Estas propiedades se pueden conseguir con cierta tratación basada en nanopartículas.

La estructura de las alas de mariposa, la hoja del loto así como las patas de algunos insectos son todos ejemplos que se tratan de superficies impermeables en las que las gotas de agua no solo no mojan su superficie sino corren por ella rápidamente. Esta propiedad de auto-limpieza de las superficies hidrófobas con ángulo de contacto estático mucho mayor a 100° , podría aplicarse a la mayoría de productos y superficies ofreciendo protección. El fenómeno se explica por el hecho de que la gota de agua no puede penetrar en las micro/ nano estructuras y humedecer la superficie. Tanto los mecanismos de recubrimiento hidrofílico como hidrofóbico encuentran aplicación en superficies de construcción planas y materiales de base tales como azulejos, piedras y madera entre otros. [40]

5.2.1 Hidrofobicidad

La hidrofobia es una propiedad fundamentalmente químico-física. Se basa por un lado, en el ángulo de contacto estático entre la gota de agua con la superficie, y por otro lado, en conseguir que ese ángulo ofrezca la mayor inclinación posible para alejar la gota lo máximo posible de la

superficie. Cuando el ángulo de contacto se encuentra entre 90 y 150 grados, se obtienen propiedades ultrahidrofóbicas que repelen el agua y cuando el ángulo de contacto supera los 150 grados, a escala nanométrica, se amplifica el efecto de la tensión superficial del agua y se genera en una superficie superhidrofóbica imposible de mojar. [41]

5.2.2 Hidrofilicidad:

Este procedimiento es lo contrario al tratamiento hidrofóbico que se presentó anteriormente y se realiza para modificar superficies más amigables al agua. Con el tratamiento hidrofílico en una superficie se aumenta su energía superficial lo cual presenta una capacidad de adhesión elevada. El tratamiento hidrofílico comienza introduciendo un gas precursor dentro de la cámara en la que la combinación de energía y la presión baja hace que el gas se ionice y se transforme en plasma. Los iones excitados del plasma bombardean la superficie y cambian con ello su geometría a nivel microscópico y así se mejora la humectabilidad y adhesividad de la superficie [42]

5.3 Recubrimientos Foto-catalíticos basados en óxido de titanio nanométrico.

Descontaminantes

Las zonas urbanas de las grandes ciudades presentan una gran condensación de contaminación ambiental caracterizándose por la presencia de NO_x, SO_x, CO₂, VOC's, partículas en suspensión, etc. La aplicación de recubrimientos fotocatalíticos sobre las distintas infraestructuras urbanas puede ayudar a reducir este fenómeno limpiando el aire de estas sustancias perjudiciales tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Como se ha presentado anteriormente para la activación del efecto fotocatalítico es necesaria la introducción de un catalizador al material y existen diferentes formas de incorporar este fotocatalizador siempre con el fin de conseguir un recubrimiento homogéneo, pero sobre todo bien adherido al soporte (pavimento, pintura, azulejo, baldosa, cubiertas, tejidos, polímeros, vidrio, superficies metálicas, conductos de aire acondicionado, etc.). Por último, además de sus valores descontaminantes y desinfectantes favorecen una higiene prolongada al disponer de un factor que repela las partículas contaminantes en su superficie. [43]

Auto-limpiables

Los fotocatalizadores aumentan las reacciones químicas bajo irradiación con luz lo cual es particularmente cierto para la descomposición de sustancias orgánicas como grasas y aceites. El TiO₂ nano-estructurado posee un área de superficie específica alta, un volumen y un tamaño de poro elevado, una actividad alta y una baja densidad, propiedades que aumentan el área de superficie accesible y la transferencia de masa para la adsorción de contaminantes orgánicos. Estos recubrimientos auto-limpiables benefician notablemente el mantenimiento del edificio, ya que reducen la necesidad de una costosa limpieza de la superficie. Se pueden cubrir varios tipos de superficies con TiO₂ para que se autolimpie con luz solar y artificial. Por lo tanto, las superficies basadas en pinturas, cerámicas, vidrio, materiales cementosos que contienen

nanopartículas de óxido de titanio tienen aplicaciones generalizadas para crear áreas ambientalmente limpias. [39] Además, bajo este efecto fotocatalítico las superficies muestran una excelente capacidad hidrófila y así por una parte se presenta una capacidad que evita las manchas por las marcas de cal y por otra parte otra fácil limpieza con el agua de la lluvia. [44]

Antibacterianos y Antivíricos

Como se ha explicado también anteriormente la fotocatalisis basada en óxido de titanio puede eliminar casi todos los tipos de bacterias bajo irradiación de la luz. Así, puede llegar a eliminar el 99% de bacterias y virus conocidos, incluyendo algunas variantes como la gripe aviar o la gripe. Gracias a esta propiedad, las superficies de TiO_2 han sido muy utilizadas en sitios que normalmente son de alta existencia de bacteria y virus como hospitales, instituciones, escuelas etc. [44]

Tratamiento de aguas

El brusco desarrollo de la contaminación del agua ha conllevado a buscar métodos e investigaciones para reducir dicho fenómeno. [45] Hoy en día la posibilidad de tratamiento y purificación de agua mediante el efecto fotocatalítico basado en nano-partículas de dióxido de titanio, es un tema que llama mucho la atención al nivel internacional ya que a parte de su propiedad descontaminante dispone de un valor óptimo para tratar con propiedades contaminantes y la ventaja de la alta posibilidad de poder usar como fuente la radiación solar como energía primaria llegando a un objetivo parcialmente ambiental. [44]

Anti-hongos

El TiO_2 elimina y evita el desarrollo de algas, hongos y moho evitando la contaminación del agua. [44]

Anti-polvo

Las superficies en las que está aplicado algún recubrimiento foto-catalítico basado en TiO_2 , reaccionan con la luz, y se cargan negativamente. También el polvo fino suele estar cargado negativamente lo cual hace que se repelan mutuamente y que se mantengan las superficies de limpias. Además, debido al efecto antiestático se evita la absorción de partículas de casi todos los tipos de polvo volante, cenizas, y suspensión de polvo. [44]

Recubrimientos Desodorizante

Así mismo siendo el proceso de fotocatalisis heterogénea un factor inhibidor de la contaminación del agua conlleva que sea un gran desodorizante evitando así malos olores.”[44]

5.4 Resistentes a la Radiación UV

Las nanopartículas pueden proporcionar una resistencia UV mejorada para recubrimientos con solventes, a base de agua y UV. Los recubrimientos transparentes que absorben o bloquean los rayos UV actualmente tienen dos aplicaciones principales: como una laca de protección UV para superficies de madera, y como un recubrimiento de barrera UV depositado en la superficie de productos o dispositivos basados en polímeros para frenar su deterioro. A medida que la intensidad de la radiación ultravioleta (UV) aumenta cada año, se buscan con urgencia métodos eficaces para bloquear los rayos UV para proteger , los plásticos, la madera y otros materiales poliméricos. La radiación UV también puede causar daños severos en textiles, plásticos, pinturas y productos de madera en forma de decoloración, formación de tiza y propiedades mecánicas reducidas. Por lo tanto, el desarrollo de materiales efectivos de protección UV es de gran importancia para nuestra salud, sociedad y medio ambiente.[39]

Las nanopartículas que contienen recubrimientos funcionales para lograr propiedades de bloqueo de la luz UV se han desarrollado durante la última década. El óxido de zinc (ZnO), el dióxido de titanio (TiO₂) y el óxido de cerio (CeO₂), las nanopartículas se utilizan para productos de protección de la luz UV para lacas. Las nanopartículas muestran un aumento significativo en la efectividad del bloqueo de la luz UV en comparación con el material natural debido a su gran relación área superficial / volumen.[39]. Actualmente no existen en el mercado productos especializados para la industria de la construcción.

5.5 Recubrimientos y Vidrios Anti-Fuego

Existen nanorecubrimientos ignífugos mediante la adición de hidróxidos dobles de aluminio (LDH) de magnesio de tamaño nanométrico, óxido de titanio (TiO₂) y óxido de silicio (SiO₂). Una pintura tipo emulsión preparada usando una Emulsión Nanocompuesta (NCE) contenía partículas de sílice y poliacrilato de tamaño nano y los resultados demostraron la excelente propiedad anticontaminación y la alta resistencia a la llama del producto.[39]

El vidrio especial resistente al fuego se forma de dos paneles de vidrio con un relleno de solo 3 mm de SiO₂ a nanoescala, que produce espuma en caso de incendio. Dichos paneles pueden soportar un fuego continuo de más de 1000 ° C para una duración de tiempo hasta 120 minutos. Adicionalmente tienen la ventaja de ser muy livianos y delgados. El recubrimiento es apenas visible. Más allá de las aplicaciones en edificios, estos paneles también se usan para ventanas de barcos y ojos de buey. Usando nano-SiO₂, los paneles sándwich livianos de paja y cáñamo, como los que se usan en la construcción de ferias comerciales, se pueden revestir y hacer resistentes al fuego. A pesar del revestimiento similar al vidrio, los paneles son difusibles y, al final de su vida útil, normalmente se pueden triturar y desechar.[46]

Las partículas de silicato nano-estructuradas se pueden incorporar en plásticos para optimizar sus propiedades ignífugas y su resistencia al calor. Tales materiales nanocompuestos se aplican, por ejemplo, en la producción de aislantes o cubiertas de cables (por ejemplo, cajas de fusibles, tomas de corriente) en acabados interiores.[46]

5.6 Recubrimientos Anti-Corrosión

La corrosión es un problema significativo más para los propietarios de equipos industriales, instalaciones y plantas. Como es un proceso lento, puede cambiar, asumiendo muchas formas y que surgen muy rápidamente hasta que se desencadena por factores ambientales, como el oxígeno y el agua, que no puede ser eliminado. Sin embargo, es muy probable, que prevenga la corrosión, y es muy importante que los nano-recubrimientos puedan cambiar el foco del problema de la protección contra la corrosión a su prevención.[39]

Los revestimientos protectores que incorporan nanopartículas han sido desarrollados como revestimientos industriales de protección, recubrimientos de protección contra la corrosión, resistentes al calor, recubrimientos ignífugos, revestimientos anticorrosión a base de agua y polímeros ignífugos. Las nanopartículas tales como nano-sílice, arcilla, ZnO, Fe₂O₃ y TiO₂ se usan típicamente en revestimientos orgánicos para mejorar la resistencia a la corrosión. Estos nanomateriales tienen un área de superficie muy alta. Cuando esta superficie está funcionando, puede suministrar altas cargas de inhibidores de corrosión orgánicos. Por lo tanto, las nanopartículas adaptadas son el portador perfecto para la administración del nivel necesario de inhibidores de corrosión activos. La ingeniería de nanomateriales también amplía la posibilidad de diseñar revestimientos "inteligentes" que puedan liberar inhibidores de corrosión a demanda cuando se rompe el recubrimiento, se estresa o se aplica una señal de control eléctrico o mecánico al recubrimiento.[39]

5.7 Recubrimientos Anti-grafiti

Los nanorecubrimientos anti-grafiti y, en general los recubrimientos fáciles de limpiar han adquirido una gran atracción en el mercado, especialmente en los materiales de construcción. Hablamos de unos recubrimientos basados principalmente en óxido de titanio (TiO₂) nanoestructurados y prometedores en superficies históricas y de piedra. Además utilizan nanopartículas de sílice en un poliuretano anti-graffiti permanente, recubrimiento que afecta positivamente el rendimiento anti-graffiti contra los ciclos de envejecimiento.[39]

En general los revestimientos que incorporan nanopartículas han sido desarrollados con pinturas duraderas, fáciles de limpiar y recubrimientos antigraffiti para edificios y estructuras. En los últimos años se han desarrollado recubrimientos antigraffiti que incluyen el uso de poliuretanos modificados con polisiloxano cuya resistencia a la intemperie aumenta al agregar nanopartículas de sílice.[39]

La pintura anti-graffiti se ha desarrollado al funcionalizar nanopartículas y polímeros para formar un recubrimiento que repele el agua y el aceite al mismo tiempo. Como resultado, la superficie recubierta es antiadherente y muy fácil de limpiar, y capaz de resistir los ataques repetidos de graffiti. Los recubrimientos nanoestructurados representan la última área de aplicación para recubrimientos anti-graffiti al hacer que la superficie sea altamente hidrofóbica independientemente de su naturaleza y protegerla del agua, minimiza la adherencia de la pintura de graffiti y facilita el proceso de eliminación con agua, detergentes suaves o limpieza de las manos mediante el uso de un paño.[39]

5.8 Recubrimientos de Abrasión y Anti-desgastes

Al diseñar materiales compuestos a nanoescala, es posible obtener materiales superduros que rivalizan con el diamante en rendimiento. En aplicaciones de mecanizado y resistente al desgaste, los revestimientos duros son esenciales para mejorar la resistencia al desgaste y las propiedades de durabilidad de las herramientas de corte. Los revestimientos convencionales no satisfacen las necesidades de los requisitos actuales de mecanizado y fabricación, así como los revestimientos nano-estructurados.[39]

La durabilidad de la superficie y la resistencia al desgaste de los materiales se pueden mejorar significativamente a través de un recubrimiento nano-particulado que hace que el material base sea más duro y mejore la resistencia al desgaste de la superficie. Las nanopartículas mejoran la resistencia al desgaste y las propiedades de tenacidad y ofrecen una inhibición completa de la corrosión, aparte de cumplir con los requisitos normativos y de seguridad. La investigación es muy activa y se ha logrado un progreso significativo. Ya hay muchas aplicaciones comerciales en estructuras mecánicas y en el mecanizado de materiales. El énfasis está en el tratamiento de metales, pero también se han mostrado resultados prometedores para materiales no metálicos.[39]

La estructuración a nanoescala utilizando nano-tamaños de granos y nano-capas ayuda a prevenir / fijar las dislocaciones, mejorando así dramáticamente las propiedades de resistencia al desgaste.[39]

Dichos nanorecubrimientos también mejoran significativamente otras propiedades tales como la tenacidad y la resistencia al choque térmico de la superficie prevista para una variedad de materiales convencionales tales como cerámicas, materiales compuestos y aleaciones metálicas.[39]

5.9 Recubrimientos Electrocrómicos

Materiales nano-crómicos, como el óxido de tungsteno (WO_3), el óxido de níquel (NiO_2), el óxido de titanio (TiO_2) y el óxido de vanadio (VO_2) se pueden aplicar como capas delgada en los vidrios de las ventanas como revestimientos energéticamente eficientes. Se ha encontrado que las ventanas electrocrómicas (puesto que su color varía en función de la temperatura) son las más prometedoras para reducir las cargas de enfriamiento, las cargas de calefacción y la energía de iluminación en edificios donde se han encontrado más confiables y capaces de modular la transmitancia hasta el 68% del espectro solar total [70]. Actualmente no hay materiales de este tipo comercializados para la construcción.

5.10 Anti-Hielo

La adherencia de hielo y nieve húmeda y la acumulación excesiva en estructuras y equipos expuestos es bien conocida como una fuente de numerosos tipos de fallas y mal

funcionamiento en regiones de clima frío. Las industrias afectadas incluyen construcción de máquinas, aviación, transmisión de energía, marítima, trenes, automotriz, refrigeración, construcción y turbinas eólicas. Los efectos de la formación de hielo incluyen aumento de peso, deterioro de la función del equipo, mayor tiempo de mantenimiento y tiempos de inactividad y problemas de seguridad humana.[39]

Las superficie “hielo-fobicas” que se han desarrollado generalmente utilizan superficies superhidrofóbicas inspiradas en hojas de loto para reducir la acumulación de hielo o nieve. Sin embargo, estas superficies fallan en condiciones de alta humedad debido a la condensación del agua y la formación de escarcha e incluso conducen la adhesión de hielo arrugada debido a una gran área de superficie. Bajo un ambiente libre de heladas (por ejemplo, condiciones de baja humedad), las superficies superhidrofóbicas muestran un comportamiento prometedor en la prevención de la formación de hielo, a temperaturas tan bajas como -25 a -30 ° C.[39] Hasta hoy la fabricación de recubrimientos anti-hielo no ha llegado a la industria de la construcción. Se han presentado algunos productos para aplicaciones en ingeniería industrial.

5.11 Recubrimientos Fotovoltaicos

La Fig. 26 presenta un sistema fotovoltaico de conversión de energía solar a electricidad de corriente continua. En este sentido, ha fundado que el uso de capas nano-porosas de óxido de titanio (TiO_2) sobre una capa delgada de óxido estánico (SnO_2) es eficaz para producir más electricidad. Además, se ha propuesto la técnica antirreflectante utilizando una matriz de patrones de puntos a escala nanométrica como uno de los métodos más efectivos para lograr una alta eficiencia en los sistemas (PV).[70]

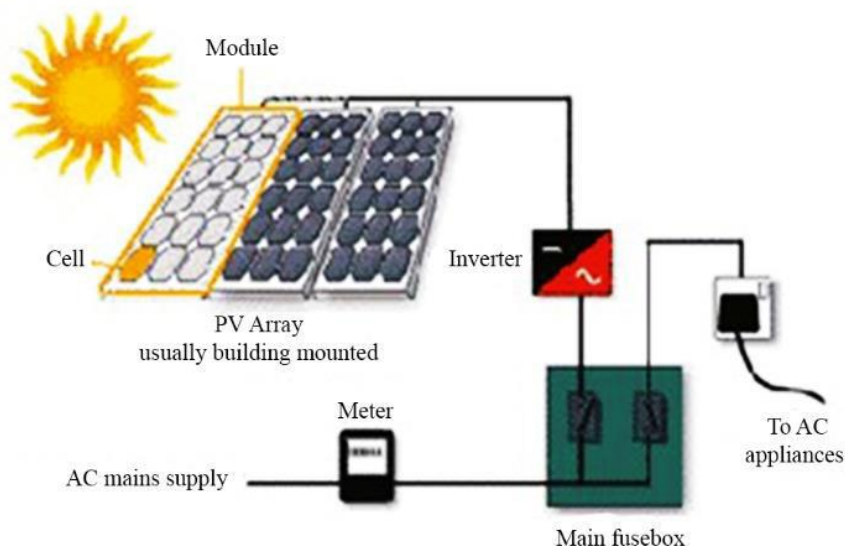


Fig. 22 Sistema Fotovoltaico[70]

5.12 Recubrimientos-Nano existentes en el mercado (Tablas 4.1, 4.2, 4.3)

Nombre	Fabricante	Función	Superficie Aplicable	+ info
TECNADIS PRS PERFORMANCE	TECNAN	Hidrofobico Oleofobico	Superficies porosas horizontales como: mármol, hormigón, mortero, caliza, teja, ladrillo, terrazo, granito, arenisca, yeso, alabastro, madera[47]	Ficha Tecnica
TECNADIS AQUASHIELD ULTIMATE	TECNAN	Super-Hidrofobico	Superficies porosas y poco porosas, verticales y inclinadas como: piedra, hormigón, cerámica, madera[48]	Ficha Tecnica
TECNADIS SELF CLEAN	TECNAN	Super-Hidrofilico	Superficies de Vidrios – Cristales[49]	Ficha Tecnica
VETROSMART	TECNAN	Hidrofilico	Superficies de Vidrios – Cristales[50]	Ficha Tecnica

Tabla 4.1: Recubrimientos-Nano existentes en el mercado

Nombre	Fabricante	Función	Superficie Aplicable	+ info
Bionictile	Ceracasa	Descontaminante	Superficies porcelanicas, principalmente fachadas[51]	Ficha Tecnica
FNNANO	LEVENGER	Antibacteriano Descontaminante Antivirico Autolimpiable Anti-Mohos Anti-Hongos	Todo tipo de superficies de interior y exterior de edificios. Especialmente para edificios con uso sanitario.[52]	Ficha Tecnica
Proclean-Air	Proclean-Air	Descontaminante	Superficies de fachadas exteriores[53]	Ficha Tecnica
KEIM Soldalit-ME	KEIM	Hidrofobico Descontaminante	Superficies como: soportes de madera, revestimientos plasto-elásticos, pinturas antiguas saponificables (p.ej. determinadas pinturas al aceite), soportes no humectables[54]	Ficha Tecnica
RUST GRIP	RUST GRIP	Anti-Corrosión	Superficies Metálicas ya oxidadas[55]	Ficha Tecnica
GENTOO	GENTOO	Anti-Corrosión Anti-Abrasión	Superficies Metálicas[56]	Ficha Tecnica

Tabla 4.2: Recubrimientos-Nano existentes en el mercado

Nombre	Fabricante	Función	Superficie Aplicable	+ info
ANTIGRAFFITI NAG	NANO – Z COATINGS LTD	Anti-Graffiti	Superficies de fachadas Estatuas Jardines Muros Cualquier otro lugar que sea propenso a vandalismo y graffiti[57]	Ficha Tecnica
Graffiti-Limpiador Suave	NANOPINTURAS	Anti-Graffiti	Superficies de fachadas y cualquier superficie que sea propensa a graffiti[58]	Ficha Tecnica
pureFOTOVOL	pureHEALTH	Fotovoltaico Autolimpiable	Paneles Fotovoltaicos[59]	Ficha Tecnica
TECNADIS HEATSHIELD	TECNAN	Aislante Térmico	Superficies de Vidrio-Cristal[60]	Ficha Tecnica

Tabla 4.3: Recubrimientos-Nano existentes en el mercado

6. Impacto del uso de nano-materiales sobre la seguridad y la salud laboral

Como se ha presentado en los capítulos anteriores el manejo de materia en la escala manométrica (1-100 nm) presenta fenómenos y propiedades únicas para los materiales de construcción.[10], por ello que cada vez más se están incrementando sus aplicaciones.

Por otra parte, siendo la nanotecnología una ciencia relativamente reciente desarrollada, sin embargo, todos estos beneficios nanotecnológicos llevan asociados la sombra de la incertidumbre sobre el riesgo que los nano-materiales pueden representar para la seguridad humana y ambiental. [61]

Los resultados de una encuesta que se realizó el 2009 en distintas empresas del sector de la construcción en 14 países europeos, demostró que la mayoría de los empleados y los representantes de los materiales, desconocían si estos productos que utilizaban eran nano-productos. Además, a partir de esto se demostró que un 70 por ciento de los trabajadores y un 80% de los representantes no eran conscientes de reconocer si están utilizando nano-materiales.[10]

El 2009 la Unión Europea a través del Comité Científico de los Riesgos Sanitarios Emergentes y Recientemente Identificados (CCRSEI) afirmaba que se han demostrado los peligros que diversos nanomateriales fabricados entrañan para la salud y el medio ambiente. Los peligros identificados indican que los nanomateriales tienen efectos tóxicos potenciales en el ser humano y el medio ambiente. Sin embargo, es preciso señalar que no todos los nanomateriales inducen efectos tóxicos. Algunos nanomateriales fabricados se han venido utilizando desde hace ya mucho tiempo (p. ej., negro de carbón y TiO_2) y su toxicidad es baja. Por consiguiente, la hipótesis de que una sustancia más pequeña es más reactiva, y por tanto más tóxica, no puede ser respaldada por los datos publicados. A este respecto, los nanomateriales son similares a productos químicos o sustancias normales, en el sentido de que algunos pueden ser tóxicos y otros no.[10]

6.1 Riesgos

Generalmente, podríamos decir que el riesgo para la salud humana interviene, por una parte por el riesgo basado en la función de la toxicidad de los materiales utilizados, y por otra parte, originado por el nivel de exposición en estos materiales, dependiendo de los distintos tipos del trabajo. [62]

Las amenazas propias de los materiales fabricados están basadas principalmente en los siguientes parámetros: [62]

El tamaño. Donde la gran diferencia entre la área superficial del material a escala nano con la del escala micro y la mayor reactividad de la nano por unidad de masa, generan unas características físico-químicas muy diferentes. [62]

La forma. La forma de la partícula es un factor también muy importante porque ya que afecta su toxicidad. Se ha demostrado que las partículas en forma de fibra normalmente son más tóxicas que las con forma esférica. [62]

La solubilidad. Al desleírse el nano-material en el organismo se comportaría como un material de tamaño no nano. [62]

Agregación o aglomeración. Debido al estado de agregación o aglomeración, se podría considerar que se aumentaría la posibilidad de exposición al material. [62]

La estructura. Por la misma razón de peligro de exposición al material, se podría considerar que la estructura amorfa o cristalina afectaría el volumen de la posibilidad de este riesgo. [62]

Todos estos factores pueden alterar la genética humana [10]

Las vías por las cuales se pueden entrar las nano-partículas en el cuerpo son: [10]

- vía inhalatoria
- vía dérmica
- ingestión
- vía parenteral.

6.1.1 Toxicidad de los nano-materiales

Para poder conseguir una adecuada valoración de los riesgos toxicológicos reales que se incluyen en los materiales de construcción se requiere un estudio relacionado en más que una ciencia. Se tendría que investigar en toxicología, ciencia de los materiales, medicina, biología molecular, bioinformática, etc. [10] Actualmente no está disponible suficiente información sobre los mecanismos de toxicidad y se considera que el mecanismo básico es el de la inducción del estrés oxidativo como esto se describió en el párrafo anterior. [62]

En la tabla siguiente se presentan los resultados de estudios toxicológicos sobre unos nanomateriales utilizados en la industria de la construcción. [62]

Nanomaterial	Efectos
Dióxido de titanio (TiO ₂)	Inflamatorios y Genotóxicos
Dióxido de silicio (SiO ₂)	Baja toxicidad sin fibrosis progresiva
Óxido de zinc (ZnO)	Estrés oxidativo en el tejido pulmonar y daño en el ADN
Nanotubos de carbono (CNT)	Toxicidad pulmonar: inflamación, fibrosis y granulomas epitelioides
Óxido de cobre (CuO)	Mayor toxicidad
Plata (Ag)	Efectos tóxicos producidos por las partículas nanométricas. Se distribuyen por la sangre, pudiéndose acumular en diversos tejidos y producir efectos en el hígado y el sistema inmunológico.

Tabla 5 : Riesgos derivados de nano-materiales construcción[62]

6.1.2 Exposición a nano-materiales

Respeto a la naturaleza y las actividades de cada nano material, las vías por las cuales se pueden entrar las nano-partículas al organismo son: [10]

- **vía inhalatoria**
- **vía dérmica**
- **ingestión**
- **vía parenteral.**

Es prácticamente difícil poder considerar el nivel de la exposición real en los nano-materiales ya que normalmente están embebidos en una matriz y así como aditivos forman parte directamente de la estructura de otros productos. Para poder darse cuenta de la exposición deberían estos nano-materiales liberarse de su matriz al ambiente. Esta liberación depende principalmente del factor de la solubilidad, y debido a esto se podría considerar que la mayor exposición sería en las operaciones que presentan en forma de polvo, niebla y en general en aerosoles. [62]

Unos ejemplos de trabajos donde que podríamos ver esta exposición en la construcción son:

- Recepción, mezclado y preparación de nano-materiales antes de la aplicación
- Aplicación de acabados de superficies
- Operaciones mecánicas de elemento basados en nano-materiales
- Gestión de residuos de materiales de construcción que contengan nano-materiales[62]

Como último, tendríamos también tener en cuenta que exposición podríamos tener debido a la producción de humos de soldadura en la obra y también debido a los residuos que se producen de las emisiones de motores diesel de los equipos de maquinaria. [62]

6.2 Medidas de prevención

Debido a los riesgos existentes previstos por exposición a nano-materiales sería necesario estudiar la posibilidad de aplicación o no de ciertas medidas preventivas. Para realizar este estudio es obligatorio disponer toda la información tanto sobre la presencia de nano materiales en los materiales de la construcción como sobre una posible liberación de los mismos al ambiente. [62]

6.2.1 Eliminación y sustitución

Una gran parte de materiales para la construcción se preparan in situ en el puesto del trabajo antes de la aplicación, lo cual es un procedimiento peligroso porque implica exposición de los trabajadores a los nano-materiales. Dando solución a este tema sería preferible o por una parte seleccionar más elementos prefabricados o por otra parte, si esto no fuera posible poder utilizar nanomateriales en forma sólida o líquida (dispersión, suspensión, pasta, encapsulamiento, etc.)

que no tengan propensión a la generación de polvo. Todo este procedimiento siempre y cuando no afecta el objetivo final que son las características del producto. [62]

6.2.2 Medidas de control técnico (según Instituto Nacional de Seguridad y Higiene en el trabajo): [62]

- Siempre y cuando sea posible, se realizará el trabajo con un método húmedo. Existen equipos portátiles que llevan incorporado un sistema de aporte de agua [62]
- Preferiblemente, se emplearán herramientas manuales o equipos portátiles de baja velocidad.
- Cuando no sea posible el trabajo en húmedo, se recomienda utilizar equipos con sistemas de aspiración y recogida de polvo incorporados o unidades móviles de aspiración. Los filtros HEPA H14 o ULPA han demostrado ser eficaces para la captura de partículas manométricas [62]
- En el caso de operaciones de pintura y revestimiento, será preferible utilizar brochas o rodillos frente a equipos de pulverización o espray[62]
- En los trabajos que se realicen al aire libre, la colocación del trabajador frente a la fuente de emisión se hará considerando la dirección del viento, para protegerse a sí mismo y al resto de trabajadores.[62]
- Se podría considerar la posibilidad de utilizar una burbuja de contención o bolsas-sacos de guantes, para confinar el polvo durante las operaciones de mecanizado y demolición y evitar su emisión al ambiente en la recogida y gestión de residuos generados[62]

6.2.3 Medidas Organizativas (según Instituto Nacional de Seguridad y Higiene en el trabajo) [62]

- Limitar al mínimo necesario la presencia de trabajadores durante las operaciones en las que se pueda generar polvo y se puedan liberar nanomateriales [62]
- Delimitar y señalizar los puestos de trabajo donde se emite polvo que puede contener nanomateriales [62]
- Se recomienda que la limpieza de los puestos de trabajo con presencia de nanomateriales se realice por aspiración, utilizando para ello aspiradores industriales equipados con filtros HEPA H14 o filtros ULPA, o mediante vía húmeda. Evitar en estos puestos el barrido con cepillo o con aire comprimido [62]
- Prestar mayor atención a las medidas de higiene personal en las pausas y al finalizar las tareas con presencia de nanomateriales [62]
- Garantizar el adecuado mantenimiento de los equipos de trabajo y de los equipos de extracción y ventilación, especialmente en los lugares cerrados (túneles, depósitos, arquetas, etc.) [62]
- Realizar el transporte en la obra de los productos en polvo en envases cerrados y correctamente identificados [62]
- Dar formación e información a los trabajadores sobre los materiales de la construcción que puedan suponer exposición a nanomateriales, los riesgos asociados y las medidas preventivas a adoptar [62]

6.2.4 Protección Individual

La protección individual se forma de equipos especiales los cuales se presentan donde y cuando las otras medidas de prevención se presentan insuficientes. Estos equipos y sus trabajadores normalmente son personas de adecuada selección, ajuste, entrenamiento especial para que puedas realizar exitosamente las tareas requeridas. Hay estudios que demuestran la efectividad de estos equipos, los cuales normalmente se tratan para operaciones puntuales, situaciones de emergencia, situaciones de alto grado de desconocimiento de las propiedades peligrosas, etc. [62]



Fig. 23: Trabajador de equipo de protección individual[62] ⁸

7. Parte Experimental

7.1 Materiales y plan de ensayos

El objetivo de esta parte experimental del trabajo es poder correlacionar de forma práctica las distintas propiedades que ofrece al cemento la adición de unos de los aditivos que se han presentado a lo largo del trabajo, con las propiedades del cemento sin ninguna adición. Por ello que se realizó un plan de ensayos por medio de los cuales se recoge la información requerida para realizar el comparativo.

A continuación se describen los materiales utilizados para la fabricación de las probetas:

- Cemento blanco BL II/B-LL 42.5 R indicado para hormigones arquitectónicos, morteros y prefabricados vistos de la marca CEMEX.
- Árido para hormigón (arena) de la marca ARENES BELLPUIG
- Aditivo supe-plastificante PowerFlow 3195 de la marca MC
- Aditivo nano Centrilit NC de la marca MC
- Aditivo nano Centrilit Fume SX de la marca MC
- Aditivo nano MasterRoc 865 de la marca BASF

Se decidió realizar cuatro formulaciones, una base que contiene superplastificante pero ninguna adición y otras tres con las diferentes adiciones Las referencias son:

I. **Cemento Blanco BL II/B-LL 42.5 R + Árido + Aditivo superplastificante**

Segunda Formulación:

- II. Cemento Blanco BL II/B-LL 42.5 R + Árido + Aditivo superplastificante + **Centrilit NC**

Tercera Formulación:

- III. Cemento Blanco BL II/B-LL 42.5 R + Árido + Aditivo superplastificante + **Centrilit Fume SX**

Cuarta Formulación:

- IV. Cemento Blanco BL II/B-LL 42.5 R + Árido + Aditivo superplastificante + **Nano-silice MasterRoc 865**



Fig.24 Cemento y Árido (Arena)

A continuación y durante el plan de ensayos hubo también una reunión con el representante de la empresa MC en Barcelona en la cual acordamos realizar los siguientes ensayos:

- **Resistencia a Flexión**
- **Resistencia a Compresión**
- **Absorción al agua líquida**
- **Porosidad**
- **Permeabilidad al Vapor de Agua**

Posteriormente se sigue con la consulta de normativas por las cuales están regidas estos ensayos, conociendo los procedimientos y las herramientas necesarias para cada uno de ellos.

Además, es necesaria la normativa referente a la fabricación de probetas de 40x40x160, y la normativa referente a la conservación de probetas.

Una vez conocidas las dosificaciones de todas las combinaciones, comenzó el proceso de la realización de las probetas necesarias para los ensayos. Para cada una de las combinaciones d se han fabricado las siguientes probetas:

3 Probetas – 40X40X160 mm

2 Probetas – 100X100X20 mm

Por último, una vez conocidos los procedimientos de los ensayos y la cantidad de material necesario para la fabricación, se realizó una planificación de tiempo para que el resultado sea lo más eficiente posible debido al tiempo disponible. Al principio del plan de ensayo se había decidido ensayar las probetas sobre resistencias mecánicas, endurecidas a los 7, 14, 21 y 28 días pero un retraso en el recibo del material nos dejó cortos de material y tiempo. Por ello que se ensayan las probetas en 7 y 21 días a flexión y compresión.

7.2 Dosificaciones y Preparación de Probetas

La dosificación para la preparación de probetas está basada en las recomendaciones para hacer GRC (Hormigón Armado con Fibra de Vidrio) UNE-EN 15191:2011 [63], manteniendo una proporción de cemento: árido 1:1 y una relación agua cemento 0,25, adaptada así a la producción de GRC por vía de premix (o colado) con consistencia autonivelante 2%. No se incluye la fibra de vidrio.

La dosificación de los aditivos nano está basada en las recomendaciones de los fabricantes de los productos, proporcionadas en la cantidad de cemento.

Centrilit NC: 5%

Centrilit Fume SX: 10%

MasterRoc MS685: 5%

A continuación, se muestra un cuadro resumen con las cantidades de materiales utilizados para la realización de las probetas

Referencias	Cemento(Kg)	Arido (Kg)	Agua (lt)	Autonivelante(gr)	Aditivo NANO(gr)
CI BASE	2,5	2,5	0,6	50,0	
CII CENTRILIT NC	2,5	2,5	0,6	50,0	125,0
CIII CENTRILIT FUME SX	2,5	2,5	0,6	50,0	250,0
CIV NANOSILICE MasterRoc MS685	2,5	2,5	0,6	50,0	125,0

Tabla 6 : Dosificación de las Probetas

Los aditivos CENTRILIT FUME SX y NANOSILICE MasterRoc MS685 vienen en forma de suspensión líquida y el CENTRILIT NC en forma de polvo.

Para la preparación de probetas se han utilizado los siguientes elementos y los diferentes factores de la elaboración fueron según indicaciones de la norma UNE EN 1015-2 [64].

Moldes



Por una parte se utilizaron moldes de acero para las probetas de **40x40x160 mm**. Estos moldes se montan y desmontan muy fácil por eso que ofrecen un desmolde muy cómodo. También llevan unos seguros con rosca para fijar bien el conjunto evitar posibles movimientos. Antes de usar estos moldes se aplica con cuidado una capa de aceite desencofraste. Si el afeite es mas de lo necesario puede afectar las propiedades del cemento. Por último se apretan bien los seguros y está listo para recibir el material.

Fig.25 Molde de acero

Por otra parte se han utilizado moldes de silicona para la preparación de las probetas tipo placa de **100X100X20 mm**. Como en los moldes de acero se aplica en estos también una fina capa de aceite desmoldante antes de poner el material.



Fig.26 Molde de Silicona

Balanza Eléctrica



Fig. 27 Balanza Eléctrica

Con esta balanza y utilizando recipientes metálicos se empezaron a pesar unos por uno los materiales necesarios para la mezcla. Al principio se ha pesado el cemento y la arena y a continuación el agua y todos los aditivos por separado.

Mezcladora Eléctrica



Fig.28 Mezcladora Eléctrica

A continuación, utilizando esta mezcladora comienza la preparación de la mezcla añadiendo primero el cemento y la arena y se quedan mezclando durante 30 segundos. Luego se añade el autonivelante y justo después el agua comenzando así el amasado durante 90 o 120 segundos. Para los aditivos nanos, el punto que se añaden en la mezcla depende de su forma. Si están en forma de polvo se añaden con el cemento y la arena, pero si están en suspensión líquida se añaden entre el autonivelante y el agua.

Una vez la pasta hecha, se deposita en los moldes en dos fases. Al principio se llena el molde hasta la mitad dándole seguidamente golpes uno por segundo durante 60 segundos, para que la pasta se asiente. A continuación se deposita el resto de la pasta hasta llenar el molde y dando de nuevo a dar golpes durante otros 60 segundos.

Se apoyan todos los moldes en una mesa disponible dejándose curar en las mismas condiciones ambientales para 24 horas y cuando pase este tiempo se desmoldan con cuidado.

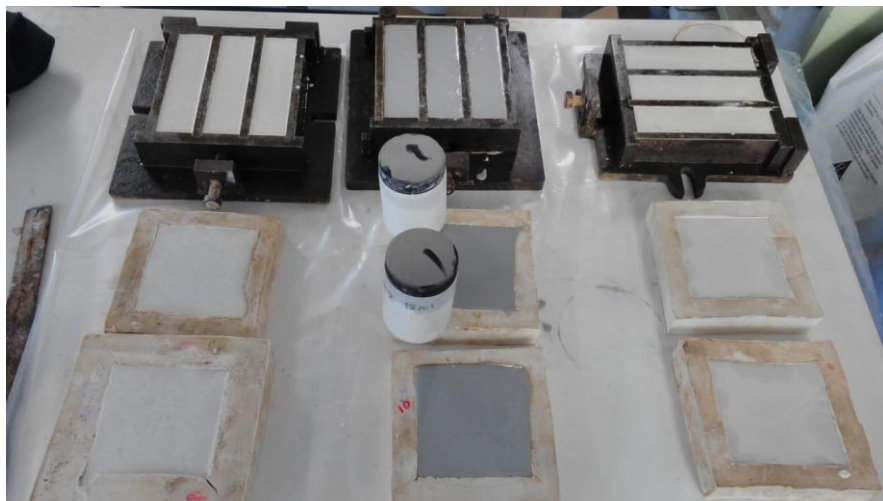


Fig. 29 Probetas justo después de su deposición en los moldes.

Para reflejar las condiciones habituales de una planta de prefabricados, las probetas tipo placa 100X100X20 mm se dejan en la misma mesa y las probetas 40X40X160 mm se ponen en la cámara de curado con humedad entre 98% y 100%. (Fig. 30) Allí se quedan curando hasta 7 y 21 días respectivamente pero siempre hasta 20 minutos antes del ensayo como indica la norma.



Fig.30 Probetas en la cámara de curado.

Se han fabricado en total 12 Probetas de 40X40X160mm y 8 Probetas de 100X100X20mm

7.3 Resistencia a Flexión

Con este ensayo se trata de comprobar la resistencia de cada una de las probetas fabricadas a flexión y con los resultados obtenidos poder comparar las diferentes combinaciones..El ensayo a Flexión se ha basado en las especificaciones de la norma UNE EN 1015-11 [65]

Dispositivos y Procedimiento

Para la realización de este ensayo se ha utilizado prensa de la casa Wykeham Farrance con célula de carga máxima de 5000 kg, provista de un utillaje específico para la aplicación de una carga puntual de una probeta biapoyada y conectada a un ordenador con el software adecuado para registrar la carga máxima recibida. La distancia entre los dos rodillos donde es de 100 mm y allí se apoya concentrada la probeta para que el pistón aplique la carga perfectamente centrada.



Fig.31 Prensa para rotura por flexión y monitor

A continuación se ajusta el pistón a 1mm aproximadamente de la probeta y se tara a cero el programa. Luego se baja la prensa hasta que se rompa la probeta. Se apunta la carga de la rotura.

Teniendo en cuenta la carga de rotura, la sección de la probeta y la separación de los rodillos se pueden calcular los resultados utilizados.

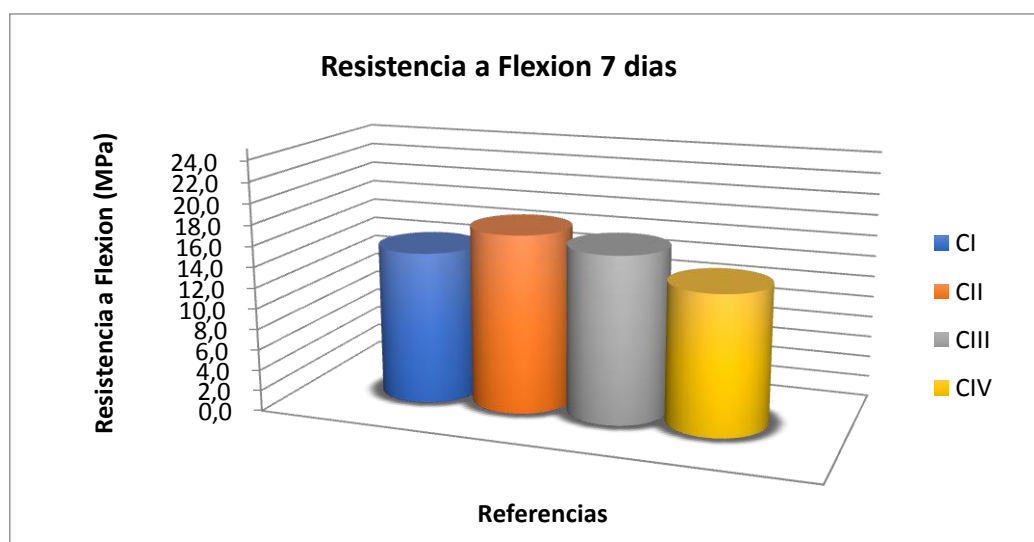
Resultados

En las tablas siguientes se presentan los resultados obtenidos referentes a resistencias a flexión de las 4 formulaciones a los 7 y a los 21 días. Los gráficos a continuación expresan estos resultados gráficamente, ayudando compararlos más fácilmente.

Tabla 7: Resistencias a flexión 7 días

7 DÍAS	Resistencia a Flexión (MPa)			
	Referencias	\bar{x}	S	% S
	CI BASE	14,72	0,1	0,82
	CII CENTRILIT NC	17,20	0,6	3,50
	CIII CENTRILIT FUME SX	16,09	1,7	10,70
	CIV NANOSILICE MasterRoc MS685	13,43	1,0	7,57

Gráfico 1: Resistencias a flexión 7 días



Observaciones de los resultados

En este ensayo desde principio se han presentado unos valores de resistencia a flexión enormes superando como mucho los valores que normalmente se suelen presentar en un ensayo para cementos y morteros convencionales (habitualmente 2.0 – 4.5 MPa).

Analizando los resultados obtenidos a los 7 días de endurecimiento y teniendo como base de comparación la combinación (I) que no lleva nano-aditivo se ve que hay unas diferencias en las resistencias ofrecidas. La referencia con el aditivo Centrilite NC tiene la mayor resistencia a flexión entre las probetas ofreciendo un valor notablemente superior que la referencia (I). A continuación se ve que la adición de Centrilite Fume SX al cemento también ofrece mayor resistencia a flexión. La referencia con el aditivo de nano-silice presenta resistencias parecidas que el material sin ninguna adición.

Repitiendo el ensayo sobre las resistencias a flexión a los 21 días de endurecimiento, no se han podido recopilar los resultados expectativos debido a un disfunción en la prensa de flexión. Los valores que se han presentado se habían disminuido a un 50% de los valores obtenidos de resistencia a 7 días. Basando a estas diferencias y en el hecho que los valores de resistencia a compresión eran los que se esperaban, se ha considerado que la prensa de flexión sufría una disfunción.

7.4 Resistencia a Compresión

Con este ensayo se trata de comprobar la resistencia de cada una de las probetas fabricadas a compresión y con los resultados obtenidos poder comparar las diferentes combinaciones. Los ensayos a compresión y flexión se han basado en las especificaciones de la norma UNE EN 1015-11 [65]. En el caso del ensayo a compresión y teniendo en cuenta los elevados valores de resistencia obtenidos en el ensayo a flexión se ha supuesto que la carga máxima de la prensa Wykeham Farrance no sería suficiente para romper las probetas a compresión. Por lo tanto se ha utilizado otra prensa con carga máxima a 100.000kg.

Dispositivos y Procedimiento



Fig.32 Prensa para rotura por compresión

Se utiliza prensa con célula de carga máxima de 100.000 kg, provista de un utillaje específico para la aplicación de una carga en una probeta y conectada a un ordenador con el software adecuado para registrar la carga máxima recibida.

A continuación la probeta se centra para que el pistón aplique la carga perfectamente centrada y luego se ajusta el pistón a 1mm aproximadamente de la probeta y se tara a cero el programa. Luego se baja la prensa hasta que se rompa la probeta. Se apunta la carga de la rotura.

Teniendo en cuenta la carga de rotura, la sección de la probeta y la separación de los rodillos se pueden calcular los resultados utilizando la formulación adecuada.

Resultados

En las tablas siguientes se presentan los resultados obtenidos referentes a resistencias a compresión de las 4 referencias a los 7 y a los 21 días. Los gráficos a continuación expresan estos resultados gráficamente, ayudando compararlos más fácilmente.

Tabla 8: Resistencias a compresión 7 días

7 DÍAS	Resistencia a Compresión (MPa)			
	Referencias	\bar{x}	S	% S
	CI BASE	68,81	2,7	3,98
	CII CENTRILIT NC	74,13	4,1	5,47
	CIII CENTRILIT FUME SX	70,94	0,7	0,94
	CIV NANOSILICE MasterRoc MS685	71,51	3,1	4,39

Gráfico 2: Resistencias a compresión 7 días

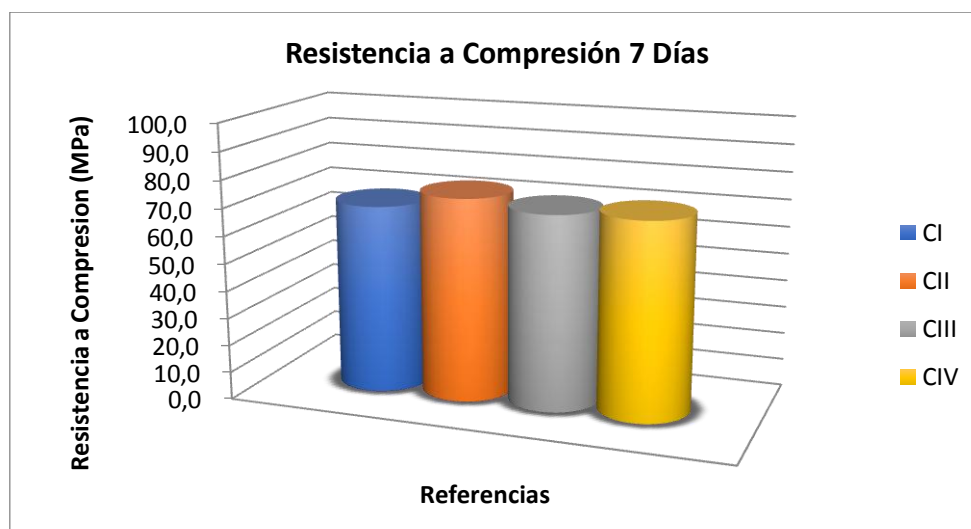
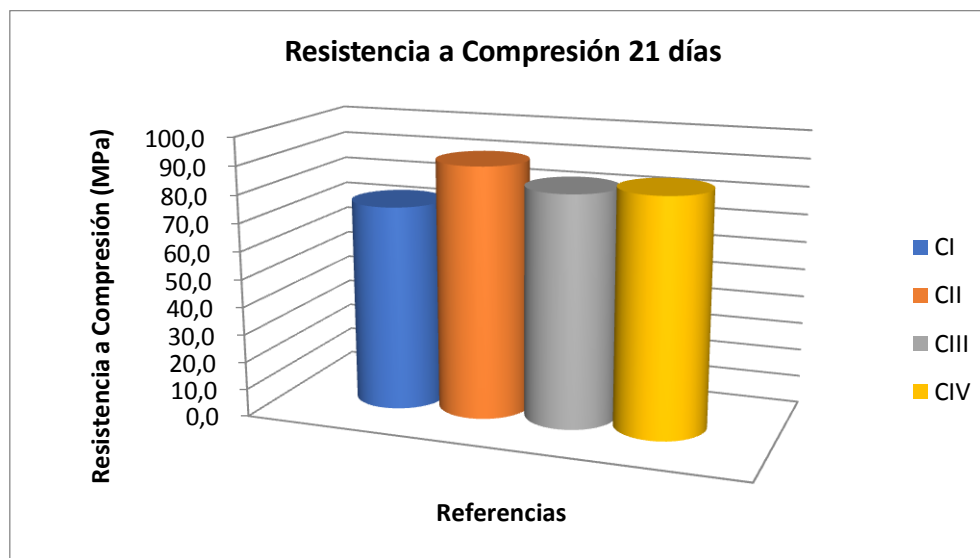


Tabla 9: Resistencias a compresión 21 días

21 DÍAS	Resistencia a Compresión 21 días (MPa)			
	Referencias	\bar{x}	S	% S
	CI BASE	73,96	3.9	5.33
	CII CENTRILIT NC	90,41	1.2	1.34
	CIII CENTRILIT FUME SX	83,06	0.3	0.31
	CIV NANOSILICE MasterRoc MS685	84,71	2.9	3.48

Gráfico 3: Resistencias a compresión 21 días



En este ensayo, igual que en el ensayo de flexión, los valores de resistencia a compresión que se han presentado desde el principio son muy elevados superando como mucho los valores que normalmente se suelen presentar en un ensayo para cementos y morteros convencionales. (habitualmente 14.0 – 20.0 MPa para endurecimiento de 7 días y 22.0 – 30.0 para endurecimiento de 21 días.)

Analizando los resultados obtenidos a los 7 días de endurecimiento y teniendo como base de comparación la combinación (I) que no lleva nano-aditivo se ve que hay unas diferencias en las resistencias ofrecidas. La referencia con el aditivo Centrilit NC, igual como en flexión, tiene la mayor resistencia a compresión entre todas las probetas ofreciendo un valor notablemente superior que la referencia (I). La adición de Centrilit Fume SX y de nano-sílice MasterRoc al cemento se ve que también ofrece resistencias a compresión superiores que las resistencias ofrecidas del material sin ninguna adición.

Sobre los resultados a 21 días de endurecimiento, los valores de resistencia a compresión que se han presentado eran mayores que los valores iniciales para todas las referencias. El orden de clasificación desde la más resistente a menos resistente sigue siendo el mismo con la probeta que lleva el Centrilit NC en el primer lugar. Lo que se ha diferenciado bastante en comparación que las resistencias iniciales es la diferencia entre el ritmo que desarrollan sus resistencias los casos que llevan aditivo nano, en comparación con el caso que no lleva. Se ha notado que la diferencia entre las resistencias de 7 y 21 días es mucho mayor para los casos que llevan nano-aditivo que para el caso que no lleva. Así se podría considerar que la adición de estos nano-productos al cemento aumenta notablemente las resistencias a largo plazo.

7.5 Absorción al Agua Líquida

Con este ensayo se comprueba la capacidad que tienen las diferentes probetas fabricadas frente a la absorción de agua en un periodo determinado de tiempo y está basado en las especificaciones de la comisión RILEM 25-PEM. [66] El material está endurecido a 8 días.

Dispositivos y Procedimiento

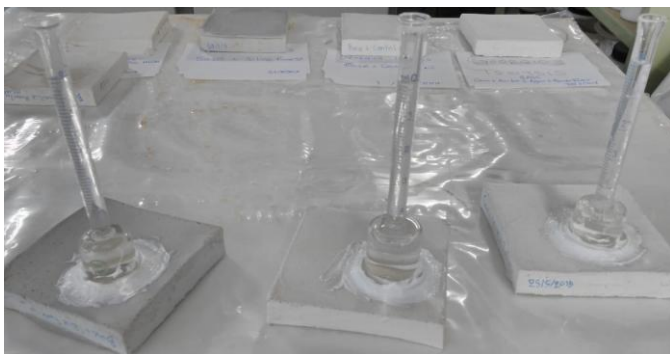


Fig.33 Tubos Karsten sellados en la Superficie de la Probetas

Para realizar este ensayo se utilizaron tubos Karsten según las directivas que se encuentran en artículo El tubo Karsten [67]. Para comenzar se aplica el tubo Karsten en la superficie de la probeta y se sella bien de manera de que esté totalmente impermeable la parte de la superficie que está en el interior del tubo. A continuación se llenan el tubo con agua hasta la cota 0ml y se toman datos intervalos para 2, 5, 10, 15 min [66].

Cada vez que se toman los datos de un tiempo, si el nivel de agua se ha bajado debido a la absorción, el tubo se vuelve a llenar de agua hasta la cota 0ml.

Conociendo estos valores anotados, se pueden calcular los resultados con la formulación adecuada.

Resultados

A continuación se presenta un gráfico comparativo entre las 4 diferentes combinaciones de materiales demostrando el incremento de masa respecto a la superficie en función de tiempo.

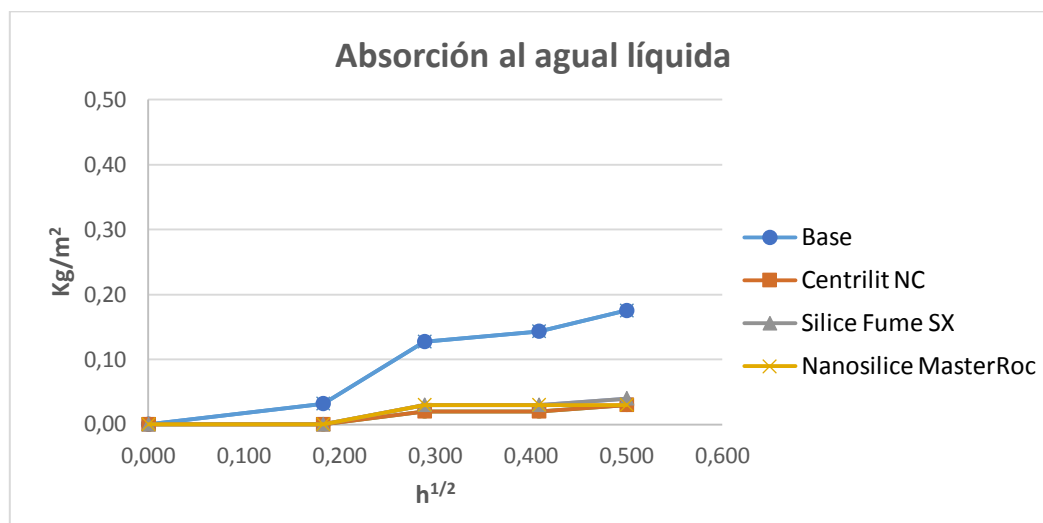


Grafico 4. Gráfico comparativo de absorción agua líquida entre las diferentes combinaciones de materiales

En la tabla siguiente se presenta la absorción al agua líquida de cada una de las 4 referencias.

Referencias		ABSORCION AL AGUA LIQUIDA
(I)	BASE	0.37 Kg/(m²h^{1/2})
(II)	BASE + CENTRILIT NC	0.07 Kg/(m²h^{1/2})
(III)	BASE + CENTRILIT FUME SX	0.08 Kg/(m²h^{1/2})
(IV)	BASE + NANOSILICE MASTEROC	0.08 Kg/(m²h^{1/2})

Tabla 10: Absorción de agua en cada combinación de materiales

Observaciones de los resultados

Como se ve en los resultados del ensayo, la absorción de agua tiene en general unos niveles bajos, pero comparando los materiales entre sí, se ven ciertas diferencias. Se ha comprobado que en los casos que hay aditicio nano los valores de absorción de agua son mucho menores que el valor del material sin adición nano. Así se puede considerar que la adición nano genera la capacidad de resistir al absorción de agua líquida el material en lo que se aplique.

7.6 Densidad aparente, densidad relativa. Porosidad

Con este ensayo y con el material en estado endurecido 9 días, se trata de determinar la densidad aparente (D_a), la densidad relativa (D_r) y el índice de porosidad accesible del material en %. El ensayo está siguiendo norma de referencia la UNE-EN 1015-10 [68].

Dispositivos y Procedimiento

Para la realización de este ensayo fue necesario un corte de las probetas para que su tamaño este correspondiente con los dispositivos del ensayo. El procedimiento comienza con una estufa de secado donde unos días antes del ensayo se dejan las muestras a secar a $80 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante (variación inferior al 0,1%).



Fig.34 Campana y bomba de vacío

A continuación, para la realización del ensayo se necesitan una campana de vacío con un sistema de llenado de agua, una bomba de vacío, una báscula con sensibilidad de 0,01 g y un dispositivo de balanza hidrostática. Para inundar las probetas, se utilizará agua desmineralizada saturada de cal, así como en el agua de la báscula hidrostática.

El ensayo empieza pesando las muestras en estado seco y se anotan las lecturas. Luego se ponen las muestras en la campana de vacío y se activa la bomba de vacío. Allí se dejan una hora para que se haga el vacío correctamente en la campana. Después con el llenado de agua se va llenando la campana pero en ritmo muy lento hasta que el agua sobrepase como mínimo 15 mm la altura de las muestras. El conjunto se queda en esta situación a para dos horas más y pasando este tiempo, se

apaga la bomba de vacío y se deja la campana cerrada con las muestras inundadas, (en nuestro caso durante 24 horas). Así se consigue la eliminación del aire contenido en los poros del material, los cuales se van

llenando de agua y así se determinan las densidades y la porosidad del material.

Como último, se pesan todas las muestras en dos maneras. Primero se ponen de nuevo en el agua saturada para evitar que esta salga de la red porosa y así se pesan en la báscula hidrostática. Después de cada pesado las muestras se vuelven a poner en la campana. A continuación se sacan de la campana de nuevo una por una y después que se escurren superficialmente se pesan de nuevo en la báscula.

Conociendo estos 3 distintos pesos de las muestras se pueden calcular los parámetros requeridos.

Resultados

En la tabla siguiente se presentan los resultados obtenidos sobre la densidad aparente (D_a), la densidad relativa (D_r) y el índice de porosidad accesible en % para cada una de las referencias que se han ensayado.

Referencias	Densidad Aparente (gr/cm ³)	Densidad Relativa (gr/cm ³)	Porosidad (%)
(I) BASE	2.10	2.53	16.9
(II) BASE + CENTRILIT NC	2.10	2.57	18.0
(III) BASE + CENTRILIT FUME SX	2.15	2.42	11.4
(IV) BASE + NANOSILICE MASTEROC	2.10	2.59	18.9

Tabla 11. Densidad aparente (D_a), densidad relativa y el índice de porosidad accesible en %

Observaciones de los resultados

Densidad Aparente y Relativa.

Por un lado la densidad aparente es el cociente entre su masa y su volumen aparente incluyendo la red porosa y los huecos del material. Por otro lado la densidad relativa es el cociente pero descontando el volumen de la red porosa, por lo tanto que su valor será siempre mayor que el de la aparente.

Los valores obtenidos para la densidad tanto aparente como relativas son bastante parecidos en todos los morteros y concluyen que existe una gran igualdad.

Porosidad.

La porosidad es prácticamente el espacio vacío que hay en el material y se define como el cociente del volumen de poros accesibles al agua entre el volumen aparente de la muestra, expresado en % . Analizando los valores obtenidos, la referencia que presenta la menor porosidad es la con adición de humo de sílice teniendo un porcentaje de 11.4%. A continuación se ve que el mortero base, aun que no lleva ninguna adición nano no tiene la mas alta porosidad entre las probetas llegando a un valor de 16.9% lo cual es menor que los valores que presentan las otras dos referencia con adición nano. Generalmente se asocia el aumento de propiedades mecánicas de los morteros y hormigones con una disminución de la porosidad del material. Sin embargo en este caso el aumento de resistencias mecánicas de las formulaciones

con aditivos, por ejemplo, Centrilit no están relacionado con una disminución de la porosidad. Es probable que algunos de los aditivos estudiados no influyan únicamente en la cantidad de porosidad si no también en la forma y distribución de la red porosa. Creemos que sería interesante poder estudiar con mayor detalle la red porosa de los diferentes morteros para evaluar las variaciones e influencia en las propiedades mecánicas.

7.7 Permeabilidad al vapor de agua

El objetivo de este ensayo es determinar la resistencia que ofrece el material frente al paso del vapor de agua obteniendo el coeficiente de resistencia al vapor de agua (μ), que es la relación entre la permeabilidad del aire y la resistencia a la difusión de vapor del material.

Dispositivos y Procedimiento

En este ensayo se utilizan 3 piezas cuadradas (45x45x20mm aprox.) de cada una de las referencias de las probetas. Para llegar a estas dimensiones fue necesario cortar las piezas las piezas iniciales de 100x100x20 mm. A continuación las muestras se ponen en la estufa de secado donde se dejan a secar a $80 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante (variación inferior al 0,1%).



Fig.35 Conjunto de molde y muestras cuadradas

En el siguiente paso las muestras cuadradas y secadas se introducen en un molde preparado para el ensayo y se sellan bien de manera que esté correcta la exposición de sus caras entre los dos ambientes haciendo de barrera de vapor. En el interior de la probeta se pone agua la cual genera una humedad relativa conocida. Se estudian dos tipos de ambiente interiores, el primero consiste en una disolución saturada de hidróxido sódico (NaOH), consiguiendo una humedad relativa del 18%; el segundo es una disolución saturada de sulfato sódico (Na_2SO_4), que nos aportará una humedad relativa del 95%.

Como último, todo este conjunto fig.35 se pesa y se anotan las siguientes lecturas:

- Temperatura y humedad actual del ambiente
- Temperatura y humedad máxima del ambiente
- Temperatura y humedad mínima del ambiente

El ensayo dura una semana y empezando lunes cada día se anotan las lecturas de los 3 puntos anteriores. Teniendo esta información se puede calcular el coeficiente de resistencia al vapor de agua (μ).

Resultados

Tabla 12. Resistencia al vapor de agua

Coef. Resistencia vapor de agua			
Referencias	Probetas	Factor resistencia al vapor de agua (μ)	Media
CI BASE	CI-1	-34.96	-39.39
	CI-2	-39.26	
	CI-3	-43.96	
CII CENTRILIT NC	CII-1	-79.43	-49.92
	CII-2	-35.68	
	CII-3	-34.66	
CIII CENTRILIT FUME SX	CIII-1	-44.56	-47.57
	CIII-2	-46.17	
	CIII-3	-51.99	
CIV NANOSILICE MasterRoc MS685	CIV-1	-44.56	-43.73
	CIV-2	-47.26	
	CIV-3	-39.39	

Observaciones de los resultados

Los resultados obtenidos de este ensayo han sido distintos que otros ensayos anteriores sobre resistencia al vapor de agua en materiales de cemento. En ningún momento a lo largo del ensayo las muestras han perdido de peso respecto a la permeabilidad del vapor de agua, así que se observa que estos materiales son totalmente impermeables.

Para comprobar la dicha observación se ha decidido realizar el siguiente ensayo.

7.8 Ensayo de determinación del ángulo de contacto estático

Respecto los resultados obtenidos en el ensayo anterior sobre la permeabilidad al vapor de agua, se ha decido realizar el ensayo de determinación del ángulo de contacto estático basado a las instrucciones de la norma UNE-EN 15802 [69]. Se ha tomado esta decisión porque a través de este ensayo se iba a determinar el carácter de permeabilidad de las probetas.

Dispositivos y Procedimiento

Para la realización de este ensayo se han tomado muestras cuadradas de las 4 referencias que habíamos fabricado y 1 muestra de cemento portland básico. Según el procedimiento las muestras se apoyan en una mesa y con un gotero se echa una gota de agua en la superficie de cada probeta. A continuación se dejan pasar 10'' con la gota encima de la superficie y se saca una foto del conjunto de posición perpendicular. (Fig. 36, Fig. 37, Fig. 38, Fig. 39). Como ultimo estas fotos se introducen en el programa Autocad donde formando la escala correcta se toman las medidas necesarias para el cálculo del ángulo estático.

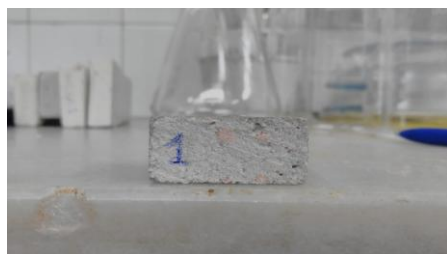


Fig.36 Muestra de Cemento Portland

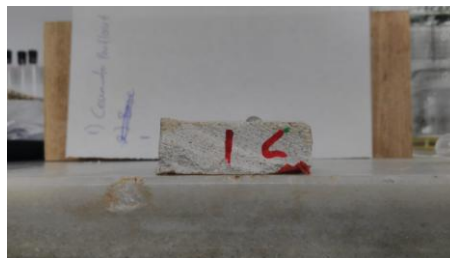


Fig.37 Muestra de la referencia CIV NANOSILICE MasterRoc MS685



Fig.38 Muestra de la referencia CI BASE

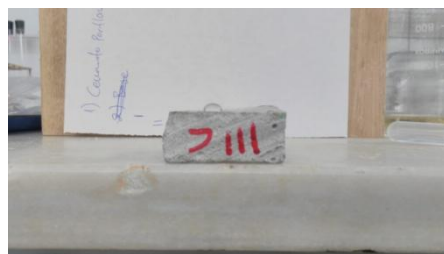


Fig.39 Muestra de la referencia CIII CENTRILIT FUME SX

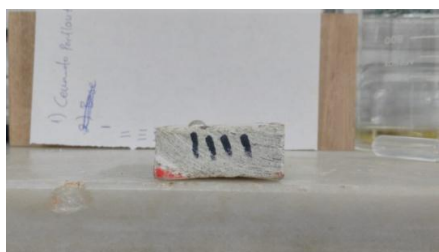


Fig.40 Muestra de la referencia CII CENTRILIT NC

Resultados

Según la norma UNE-EN 15802 [69] cuando el ángulo θ tiene un valor menor de 90° el material es permeable y cuando el ángulo supera los 90° el material es impermeable. A continuación se presenta una tabla con los resultados obtenidos del ensayo y con la caracterización de cada material.

Determinación del ángulo de contacto estático		
Referencias	Angulo de contacto estático	Caracterización
CEMENTO PORTLAND	16.4°	$< 90^\circ$ Permeable
CI BASE	164.2°	$> 90^\circ$ Impermeable
CII CENTRILIT NC	158.9°	$> 90^\circ$ Impermeable
CIII CENTRILIT FUME SX	154.9°	$> 90^\circ$ Impermeable
CIV NANOSILICE MasterRoc MS685	156.3°	$> 90^\circ$ Impermeable

Tabla 13. Determinación del 'ángulo de contacto estático.

Observaciones de los resultados

Debido a los resultados obtenidos del ensayo de determinación del ángulo de contacto estático se podría observar que las probetas que hemos fabricado son impermeables. Por ello que aun que tenga porosidad, su naturaleza impermeable no deja el vapor de agua atravesar, así que en ese ensayo de permeabilidad al vapor los resultados obtenidos fueron de esta manera. Probablemente el aditivo superplastificante que está presente en todas las formulaciones es responsable de este cambio de la tensión superficial del mortero y de la impermeabilidad al vapor de agua del mismo.

8. Conclusiones

Como se ha presentado a lo largo del trabajo la aplicación de nanotecnología a la industria de construcción ofrece muchos beneficios. En este capítulo se redactan una serie de conclusiones obtenidas en todos los capítulos que se han desarrollado a lo largo del trabajo incluyendo también unas recomendaciones sobre ellas.

Sobre las aplicaciones de la nanotecnología a los materiales cementosos se ve que hay varios mecanismos de acción a ellos, pero en la actualidad el que es más real, es el de la adición de nano-partículas. Adición de nano-partículas tanto para aumentar las resistencias mecánicas como para generar el efecto foto-catalítico ofreciendo propiedades más sostenibles. Estos casos como se ha presentado, disponen ya productos en el mercado ofreciendo en la construcción de hoy propiedades extraordinarias tanto a nivel resistencial como a nivel de sostenibilidad ambiental eliminando contaminantes. Estas son ventajas que anteriormente no estaban disponibles por los materiales tradicionales abriendo así un camino nuevo en el mundo de construcción. Además, hay otros casos de aplicaciones como la incorporación de nano-refuerzos ó hibridación de la C-S-H los cuales aun no han llegado a tener aplicaciones prácticas y siguen siendo teóricos, pero las ventajas ofrecidas de estas futuras aplicaciones vienen mucho más comprometidas. Un factor que afecta también muchísimo la realización de estas aplicaciones y su introducción en el mercado es el factor económico el cual en la mayoría de los casos hasta hoy afecta de una manera negativa. Esto pasa porque el aumento de coste que sigue estas aplicaciones es relativamente grande.

La situación es relativamente parecida también para las aplicaciones de la nanotecnología a los recubrimientos de construcción. La introducción de la nanotecnología en el mundo de los recubrimientos ha traído muchas innovaciones y ventajas que anteriormente no se podía imaginar. Ofrece protección de una variedad de efectos negativos para la construcción, como la corrosión, la suciedad, la humedad, el mantenimiento etc. que antes solo eran problemas. Incluso los casos de nano-recubrimiento para la construcción son relativamente avanzados en comparación con los casos de las aplicaciones al cemento. Esto pasa porque la nanotecnología se había introducido anteriormente en los recubrimientos de otras industrias como la industria automóvil teniendo así un conocimiento y un desarrollo previo. Teniendo en cuenta estas aplicaciones de los nano-recubrimientos tan avanzadas se podrían considerar que en el futuro los estudios de un proyecto de construcción se van a basar en estas ventajas y no solo utilizarlas para cumplir las debilidades existentes.

Se han realizado varios estudios a través de los cuales se ha demostrado que algunos de estos nano-materiales fabricados contienen peligros para la salud humana y el medio ambiente, indicando que los nano-materiales contienen efectos tóxicos potenciales. Así que la exposición a nano-materiales tendría que ser bajo condiciones controladas. Además se ha aprobado que la mayoría de los empleados y los representantes de estos materiales, desconocen el hecho de que si estos elementos que utilizaban sean nano-productos, factor que ha conllevado a crear varias medidas de prevención para garantizar su uso correcto. Lo que sería necesario es que toda esta información investigada y analizada esté disponible y sea de fácil acceso para todos. Empezando por las fichas técnicas de los productos (las cuales tendrían que tener una descripción detallada sobre su contenido en nano partículas y resultados de ensayos sobre su

toxicidad) e incluyendo instrucciones de uso correcto y seguro para los individuos que tengan contacto con estos materiales, con el fin de minimizar así el impacto negativo para su salud.

En la parte experimental se han presentado casos los cuales han confirmado exitosamente parte de la teoría que se había desarrollado a lo largo del trabajo. En varias ocasiones los resultados obtenidos por los ensayos han comprobado parte de las ventajas que ofrece el uso de la nanotecnología en las propiedades del cemento. Dichas ocasiones se pueden considerar el aumento de la resistencia a compresión sobre todo a largo plazo y el aumento de la resistencia a absorción al igual líquida. Factores como el tiempo disponible limitado para la realización de los ensayos debido a la complejidad de encontrar materiales dentro de los tiempos disponibles, no ha permitido llegar a mas resultados sobre estos materiales aun que sería muy interesante. Por otro lado, resultados como la impermeabilidad al vapor de agua en combinación con la porosidad existente, da paso para pensamiento e investigación además. Por lo tanto sería muy interesante realizar más ensayos, disponiendo más tiempo y comprobando distintas combinación de nano-aditivos.

9. Agradecimientos

En primer lugar, y en especial a mi tutora y supervisora de este trabajo, profesora **Laia Haurie Ibarra**, por la colaboración, por la disposición de su tiempo y su asesoría importante durante todo el proceso del trabajo.

A la empresa MC Spain y especialmente al Oscar Gines, representante de la empresa y intermediario entre la empresa y la universidad, por contribuir con los materiales necesarios para la realización de los ensayos y por su disponibilidad durante todo el proceso del trabajo para resolver cualquier duda y soportar el proyecto.

A los profesores y el personal del laboratorio de materiales de la EPSEB y en especial a la profesora Antonia Navarro por su colaboración durante la parte experimental del trabajo.

A la Biblioteca de la EPSEB por la disposición de información bibliográfica a lo largo del trabajo.

10. Bibliografía

- [1]. Arcus Global. "Nanotecnología en la construcción". En: *Arcus Global – Blog* [en línea]. 6 noviembre 2017? [Consulta: 6 junio 2018]. Disponible en: <http://www.arcus-global.com/wp/nanotecnologia-en-la-construccion/>
- [2]. Bartos, P.; et al. Ed. *Nanotechnology in construction*. (Special publication (Royal Society of Chemistry (Great Britain)) ; no. 292). Cambridge [England]: Royal Society of Chemistry., 2004
- [3]. "¿Qué es la nanotecnología?". En: *Euroresidentes : ¿Nanotecnología : qué es?* [en línea] [Consulta el 6 de junio 2018?] Disponible en: <https://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnologia/nanotecnologia.htm>
- [4]. Cornejo, L. "La nanotecnología y los materiales de construcción". En: *Nuevas tecnologías y los materiales de construcción*. [en línea]. 30 diciembre 2015. [Consulta: 6 junio 2018]. Disponible en: <http://nuevastecnologiasymateriales.com/la-nanotecnologia-y-los-materiales-de-construccion/>
- [5]. Sanchez, F.; Sobolev, K. Nanotechnology in concrete : a review. En: *Construction and Building Materials*. 24 (11), 2060–2071, 2010.
- [6]. Holguín, F. "Nanotecnología Top-down y Bottom-Up" [entrada de blog]. En: *Nanotecnología* [en línea] octubre 2013 [Consulta: 8 junio 2018]. Disponible en: <http://nanodinamica.blogspot.com/2013/10/nanotecnologia-top-down-y-bottom-up.html>
- [7]. Ballari, M.; Borkar, P. "Nano concrete" [en línea] en: VI Seminar Civil on Concrete. [Presentación powerpoint] Disponible en: <https://www.slideshare.net/PrachiBorkar/nano-concrete-ppt3>
- [8]. Poudyal, Lochana. Use of Nanotechnology in Concrete. [en línea]. Tesina de máster. Texas Tech University, Civil and Environmental Engineering, 2018. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2346/73805>
- [9]. "Nano-recubrimientos, resistencia en la construcción". en: *Revista en Obra* [en línea]. 23 mayo 2016 [Consulta: 9 junio 2018]. Disponible en: <https://en-obra.com/noticias/nano-recubrimientos-resistencia-en-la-construccion/>
- [10]. Galera, A. El impacto de la nanotecnología sobre la seguridad y la salud laboral. en: *ORP Journal* [en línea]. No. 2, pp. 31-58, 2015. [Consulta el 10 de febrero 2018]. Disponible en: <http://www.orpjournal.com/index.php/ORPjournal/article/view/16/41>
- [11]. Marín, J. A. Microestructura del hormigón con adición de nano sílice [en línea]. Proyecto final de carrera, Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela de Arquitectura e Ingeniería de Edificación. Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación, 2015. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10317/4671>

- [12]. Ramon Martinez, A. Estudio del sector cementero a nivel mundial y nacional, con particularización de una empresa cementera situada en la Comunidad Valenciana [en línea]. Proyecto final de carrera, Universitat Politècnica de València, Facultad de Administración y Dirección de Empresa, 2014. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10251/45659>
- [13]. Giosis, M. State-of-the-art, opportunities and challenges for nanotechnology in concrete materials for nanotechnology in concrete materials. [en línea] en: *International Conference NanoInnovation 2016*. Roma : Sapienza University of Rome. [Consulta el 5 de febrero 2018]. Disponible en: <http://www.nanoinnovation.eu/2016/presentations/TS.VIII.A.1-Marco GOISIS State-of- the art,opportunities and challenges for nanotechnology in concrete materials.pdf>
- [14]. López Molina, M. Nanopartículas y sus residuos. Incorporación en materiales de construcción. [en línea]. Tesis final de máster, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament de Construccions Arquitectòniques I, 2013. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2099.1/26056>
- [15].]Scrivener, K.L. Nanotechnology and Cementitious Materials. en: *Nanotechnology in construction 3 : proceedings of the NICOM3*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009, p.37-42
- [15b]. Garboczi, E.J. Concrete Nanoscience and Nanotechnology: Definitions and Applications. en: *Nanotechnology in construction 3 : proceedings of the NICOM3*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2009, p.81-88
- [16]. Cornejo, L. "Aplicaciones de la nanotecnología a la industria de la construcción" [entrada de blog]. En: *Nuevas tecnologías y materiales* [en línea] 15 septiembre 2015 [Consulta: 1 junio 2018]. Disponible en: <http://nuevastecnologiasymateriales.com/aplicaciones-de-la-nanotecnologia-a-la-industria-de-la-construccion/>
- [17]. *MC-FastKick!: el nuevo acelerante de MC*. MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, [2018?] [presentación técnica de producto]
- [18]. *MC-FastKick 111 : hardening accelerating admixture*. Bottrop, Germany : MC-Bauchemie Müller GmbH & ,Co. KG, 2017.[hoja técnica de producto]. Disponible en: https://www.mc-bauchemie.com/assets/downloads/products/en/technical_datasheet/MC-FastKick%20111.pdf
- [19]. Borralleras Mas, P. *Master X-Seed : cement hydration activator based on suspended CSH particles for acceletated development of concrete early strength*. Barcelona : BASF Construction Chemicals España S.L., [2009?] [documento técnico]
- [20]. *Master X-Seed : acelerador de endurecimiento del hormigón*. Barcelona : BASF Construction Chemicals España S.L. [Consulta: 1 junio 2018]. Disponible en: <https://www.master-builders-solutions.basf.es/es-es/productos/master-x-seed>

- [21]. *Centrilit NC : aditivo para hormigón basado en silicato de aluminio puzolánico*. Valencia : MC Construction Chemicals Spain, 2011 [hoja técnica de producto]. Disponible en: <http://www.mc-bauchemie.es/~media/Files/MC-Bauchemie/Products/es-ES/Technical Datasheet/Centrilit NC Suspension.pdf>
- [22]. *Centrilit Fume SX : sílice en suspensión*. Valencia : MC Construction Chemicals Spain, 2011 [hoja técnica de producto]. Disponible en: <http://www.mc-bauchemie.es/~media/Files/MC-Bauchemie/Products/es-ES/Technical%20Datasheet/Centrilit%20Fume%20SX.pdf>
- [23]. *MasterRoc MS 685 : suspensión de nanosílice precipitada*. Barcelona : BASF Construction Chemicals España, 2017 ed. [hoja técnica de producto]
- [24]. *SurfaMix® C : aditivo para aumentar la adhesión, elasticidad, y trabajabilidad de morteros de cemento y de yeso. Nanotecnología que mejora la resistencia al agua*. Mataró : Nanoavant, s.a. [ficha de producto] Disponible en: <https://www.nanoavant.es/app/download/22203803/SurfaMix+C+--+Ficha+de+Producto.pdf>
- [25]. *Nano Fluid PR*. Colombia : APLIKA, 2012 [Ficha técnica]. Disponible en: <https://aplika.webnode.es/productos/aditivospara-concreto/nano-fluid-pr/>
- [26]. *Nano sílice CROM CS-5 : aditivo nano sílice*. Chile : Cromcret, octubre 2010. [hoja técnica de producto]
- [27]. "Productos E-NANO y aditivos NEHO" [entrada web] En: *Nanotecnología E-NANO NEHO*, S.L. [en línea] [Consulta 1 junio 2018]. Disponible en: < <http://e-nanoneho.com/productos> >
- [28]. Fotocatálisis: La 'fotosíntesis' de las superficies urbanas. En: *Smart Quimic*, 2014, p.33-35
- [29]. Serrano Yuste, P. "Fotocatálisis en los materiales de construcción" [entrada blog] 2016. En: *Certificados energéticos* [en línea] [Consulta: 1 junio 2018]. Disponible en: <https://www.certificadosenergeticos.com/fotocatalisis-materiales-construccion>
- [30]. *TX Active : cementos fotocatalíticos*. Madrid : FyM Italcementi Group, [2012?]
- [31]. *TX Active Principio activo fotocatalítico : introducción técnica*. Madrid : FyM Italcementi Group, [2006?]
- [32]. *Airclean* : [solución que reduce la contaminación del aire mediante un agente descontaminante por fotocatalisis]. Llinars del Vallès : Breinco, s.d. Disponible en: https://www.breincobluefuture.com/pdfs/noticias/resum_informe.pdf [ficha técnica de producto]
- [33]. *Eco-inspired* [en línea] Llinars del vallès : Breincosmart. [catálogo] Disponible en: <https://issuu.com/breincobluefuture/docs/ecoinspire-es/9?e=0>
- [34]. *TioCem® CEM II/A-S 42.5 R (tx) : technical fact sheet*. Ennigerloh, Germany : HeidelbergCement, 2010.

- [35]. Hu, zhaoying; et al. Physically unclonable cryptographic primitives using self-assembled carbon nanotubes. En: *Nature Nanotechnology*. volume 11, 2016, pages 559–565
- [36]. Khan. "Nanotubos de carbono: electrónica" [entrada blog] 10 octubre 2013. En: *Nanotecnología: innovación tecnológica y transformación social en I-Europa* [en línea] Madrid : Fundación Telefónica [Consulta: 1 de junio 2017] Disponible en: <https://nanotecnologia.fundaciontelefonica.com/2013/10/10/nanotubos-de-carbono-electronica/>
- [37]. Guadagno, L. et al. The role of carbon nanofiber defects on the electrical and mechanical properties of CNF- based resins. En: *Nanotechnology*. Vol.24, num.30, 2013. paper 305704. Disponible en: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/24/30/305704/pdf>>
- [38].]Sebastián del Río, David. Estructura y propiedades de las nanofibras de carbono: Aplicación como soporte de electrocatalizadores. [en línea]. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza, Departamentode Ingeniería Química y Tecnologías del Medio Ambiente, 2011. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/6796/files/TESIS-2011-072.pdf>
- [39]. Anti-icing nanocoatings [en línea] en: *Nanocoatings in construction & exterior protection*, 2014 April, p.27-28
- [40]. "Recubrimiento" [sección web] En: *Laurentia technologies : coatings & capsules : productos* [en línea] [Consulta: 3 junio 2018] Disponible en: <https://www.laurentia.es/productos/recubrimientos/>>
- [41]. "Materiales ultrahidrofóbicos: de la naturaleza a la industria" [Entrada blog] En: *AIMPLAS Instituto Tecnológico del Plástico: Blog* [en línea] 01 junio 2017 [Consulta: 3 junio 2018] Disponible en: <https://www.aimplas.es/blog/materiales-ultrahidrofobicos-de-la-naturaleza-la-industria>
- [42]. "Tratamiento hidrofóbico" [entrada blog] En: *Thierry : plasma science and tecnology : conceptos fundamentales* [en línea] [Consulta: 5 junio 2018] Disponible en: <https://www.thierry-corp.com/mx/plasma/conceptos-fundamentales/tratamiento-hidrofilico/>
- [43]. Faraldos Izquierdo, M. Fotocatálisis : nanomateriales para combatir la contaminación y obtener energía. En: *Boletín del Grupo Español del Carbón*. no.41, 2016, p.9-11. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6164946.pdf>
- [44]. Lisona García, L.E. Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción [en línea] Tesis final de màster. UPC, Departament de Construccions Arquitectòniques II, 2016. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/84141>
- [45]. Garcés Giraldo, L.F.; Mejía Franco, E. A.; Santamaría Arango, J.J. La fotocatalisis como alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación* [en línea] 2004, vol.1 n.1, p. 83-92 [Fecha de consulta: 18 de junio de 2018] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69511013>>

- [46]. "Nanotechnology in construction" [entrada blog] En: *Nanowerk* [en línea] 13 septiembre 2012. [Consulta 1 junio 2018] Disponible en: <https://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=26700.php>
- [47]. "TECNADIS PRS PERFORMANCE : hidrogugante y oleofugante para construcción" [entra web] En: *Tecnología Navarra de Nanoproductos : Productos* [en línea] [Consulta: 1 junio 2018] Disponible en: <https://tecnan-nanomat.es/hidrofugante-y-oleofugante-para-construccion/>
- [48]. "TECNADIS AQUASHIELD ULTIMATE : superhidrofugante para construcción" [entra web] En: *Tecnología Navarra de Nanoproductos : Productos* [en línea] [Consulta: 1 junio 2018] Disponible en: <https://tecnan-nanomat.es/superhidrofugante-para-construccion/>
- [49]. "TECNADIS SELCLEAN : recubrimiento hidrofílico para cristales" [entra web] En: *Tecnología Navarra de Nanoproductos : Productos* [en línea] [Consulta: 1 junio 2018] Disponible en: <https://tecnan-nanomat.es/repelente-de-agua-para-vidrio-con-efecto-hidrofílico/>
- [50]. *VetroSMART : tratamiento superficial del vidrio que protege y minimiza las incrustaciones de suciedad y cal*. Los Arcos (Navarra) : TECNAN, s.d. Disponible en: <https://tecnan-nanomat.es/wp-content/uploads/2017/04/TDS-VETROSMART.pdf> [ficha técnica de producto]
- [51]. *BIONICTILE : [porcelánico con capacidad para reducir los perjudiciales óxidos de nitrógeno (NOx) y el HNO3 que hay en el aire contaminado]*. Castellón : CERACASA, 2010?. Disponible en: https://www.ceracasa.com/wpcontent/uploads/2017/11/CERACASA_PORCELANICO_low.pdf [ficha técnica de producto]
- [52]. *Fnnano : solución eficaz*. Navarra : Levens nanotecnología, [2010?] Disponible en: <https://www.fotocatalisis.org/assets/catalogo-fnnano.pdf> [hoja técnica de producto]
- [53]. Proquicesa S.L. "ProClean-Air" [entrada web] En: Asociación Ibérica de Fotocatálisis [en línea] [Consulta 1 junio 2018] Disponible en: <http://www.fotocatalisis.org/procleanair.html>
- [54]. *Soldalit-ME : pintura mineral de fachadas altamente especializada, a base de sol-silicato, con efecto fotocatalítico*. Mollet del Vallés: KEIM ECOPAINT IBÉRICA S.L., 2018. Disponible en: https://www.keim.com/fileadmin/user_upload/download-center/es/fichas-t%C3%A9cnicas/FT_Soldalit-ME.pdf [hoja técnica de producto]
- [55]. *Rust Grip : recubrimiento de protección anticorrosión*. Madrid : Nanocapa technologies s.l., s.d. Disponible en: <http://nanocapa.com/web-supertherm/ficha-rust-grip.pdf> [hoja técnica de producto]
- [56]. *Gentoo : advanced clear hydrophobic coating*. Florida : Gentoo, s.n. [ficha técnica de producto] Disponible en: https://www.gentoocoatingstore.eu/pdf/Gentoo_Coating_Brochure.pdf
- [57]. "Nano Anti Graffiti NAG" [entrada web] En: *NanoZCoating* [en línea] [Consulta 2 junio 2018]. Disponible en: <http://www.nanoztec.com/Nano-Anti-Graffiti-NAG.html>

- [58]. *Graffiti-Limpiador suave nanopinturas*. Zaragoza : Nono pinturas, 2010. [ficha técnica de producto] Referencia:GRAFFIT LIMP/SUAV
- [59]. Pure Health. *pureFOTOVOL: autolimpieza de placas solares*. Barcelona : Pure Health, [2010?] Disponible en: https://docs.wixstatic.com/ugd/1b1b58_1233502278bd4154b633527541a20130.pdf [ficha técnica de producto]
- [60]. *TECNADIS HEATSHIELD : tratamiento de barrera térmica para superficies de cristal*. Los Arcos, Navarra : TECNAM. [ficha de producto]. Disponible en: https://heatshield-by-tecnam.com/wp-content/uploads/2017/11/Ficha-Tecnica-TECNADIS-HEATSHIELD_v2.pdf
- [61]. Galera, A. "Riesgo nano en la construcción: distintos oficios, distintas nanopartículas" [entrada blog]. En: *Prevención integral* [en línea] 19 marzo 2014.[Consulta 3 junio 2018]. Disponible en: <https://www.prevencionintegral.com/comunidad/blog/decent-nanowork/2017/02/21/riesgo-nano-en-construccion-distintos-oficios-distintas-nanopartículas>
- [62]. Aguilar Franco, J. et al. *Riesgos derivados de la exposición a nanomateriales en distintos sectores: construcción* [en línea]. Madrid : NSHT, 2015
- [63]. Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE-EN 15191: Productos prefabricados de hormigón. Clasificación de prestaciones del hormigón reforzado con fibra de vidrio*. Madrid: AENOR, marzo 2013
- [64]. Asociación Española de Normalización y Certificación. *UNE EN 1015-2: Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 2: Toma de muestra total de morteros y preparación de los morteros para ensayo*. Madrid: AENOR, junio 1999
- [65]. Asociación Española de Normalización y Certificación . *UNE-EN ISO 12680-1: Métodos de ensayo para productos refractarios. Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso* . Madrid: AENOR, septiembre 2007
- [66]. RILEM. Commission 25- PEM. *Tentative recommendations/ Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods- Test No. I.1*. Paris: Unesco, 1980
- [67]. Wagner M. C. El tubo Karsten. En: *Bit*, pp. 48 - 49, Septiembre 2010.
- [68]. Asociación Española de Normalización y Certificación . *UNE-EN 1015-10 Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido*. Madrid: AENOR, marzo 2000.
- [69]. UNE-EN 15802. Métodos de ensayo de determinación del ángulo de contacto estático.
- [70]. Boostani; H. & Modirrousta, S. Review of Nanocoatings for Building Application: *Procedia Eng.* 145, 1541–1548 (2016).

ANEXOS

INDICE DE ANEXOS

	Pagina
1. Tablas de cálculos de resistencia a Flexión	79
2. Tablas de cálculos de resistencia a Compresión	81
3. Tablas de cálculos y graficas de absorción al agua líquida	83
4. Tablas de cálculos de densidad aparente, densidad relativa. Porosidad	87
5. Tablas de cálculos y graficas de permeabilidad al vapor de agua	87
6. Cálculos de resultados de determinación del ángulo estático	100

1. Tablas de cálculos de resistencia a Flexión

		RELACION cemento/arido	REFERENCIAS PROBETAS	Q Flexión	Q Flexión	T Flexión	T Flexión
				(kg)	(N)	(MPa)	(MPa)
ENSAYOS DE PROBETAS A 7 DÍAS		1/1	CI-1	601	5889,8	14,632472	\bar{x} / S
			CI-2	608	5958,4	14,802900	14,717686
			CI-3	0	0	0,000000	0,12051088
			CII-1	689	6752,2	16,7749969	\bar{x} / S
			CII-2	724	7095,2	17,6271375	17,2010672
			CII-3	0	0	0	0,60255441
			CIII-1	711	6967,8	17,3106281	\bar{x} / S
			CIII-2	611	5987,8	14,8759406	16,0932844
			CIII-3	0	0	0	1,72158404
			CIV-1	581	5693,8	14,1455344	\bar{x} / S
			CIV-2	522	5115,6	12,7090688	13,4273016
			CIV-3	0	0	0	1,01573458

		RELACION cemento/arido	REFERENCIAS PROBETAS	T Flexión		
				(MPa)		
				\bar{x}	S	% S
7 DÍAS	1/1		CI	14,7177	0,12051	0,8188
			CII	17,2011	0,60255	3,5030
			CIII	16,0933	1,72158	10,6975
			CIV	13,4273	1,01573	7,5647

	RELACION cemento/arido	REFERENCIAS PROBETAS	Q Flexión	Q Flexión	T Flexión	T Flexión
			(kg)	(N)	(MPa)	(MPa)
ENSAYOS DE PROBETAS A 21 DÍAS	1/1	CI-1	388	3802,4	9,4465875	\bar{x} / S
		CI-2	0	0	0	9,446588
		CI-3	0	0	0	0
		CII-1	343	3361,4	8,35097813	\bar{x} / S
		CII-2	0	0	0	8,350978
		CII-3	0	0	0	0
		CIII-1	409	4008,2	9,95787188	\bar{x} / S
		CIII-2	0	0	0	9,957872
		CIII-3	0	0	0	0
		CIV-1	319	3126,2	7,76665313	\bar{x} / S
		CIV-2	0	0	0	7,766653
		CIV-3	0	0	0	0

		RELACION cemento/arido	REFERENCIAS PROBETAS	T Flexión		
				(MPa)		
				\bar{x}	S	% S
21 DÍAS		1/1	CI	9,4500	0,00000	0,0000
			CII	8,3500	0,00000	0,0000
			CIII	9,9600	0,00000	0,0000
			CIV	7,7700	0,00000	0,0000

2. Tablas de cálculos de resistencia a Compresión

RELACION cemento/arido	Q COMPRESIÓN	Q COMPRESIÓN	T COMPRESIÓN	T COMPRESIÓN
	(kg)	(N)	(MPa)	(MPa)

ENSAYOS DE PROBETAS A 7 DÍAS	1/1	11740	11480	115052	112504	71,9075	70,315	\bar{x} / S
		10900	10820	106820	106036	66,7625	66,2725	68,814375
		0	0	0	0	0	0	2,73804171
		12690	11820	124362	115836	77,72625	72,3975	\bar{x} / S
		12600	11300	123480	110740	77,175	69,2125	74,1278125
		0	0	0	0	0	0	4,05743689
		11730	11500	114954	112700	71,84625	70,4375	\bar{x} / S
		11500	11600	112700	113680	70,4375	71,05	70,9428125
		0	0	0	0	0	0	0,66792463
		11000	11600	107800	113680	67,375	71,05	\bar{x} / S
		11900	12200	116620	119560	72,8875	74,725	71,509375
		0	0	0	0	0	0	3,13812867

RELACION cemento/arido	REFERENCIAS PROBETAS	T COMPRESIÓN		
		(MPa)		
		\bar{x}	S	% S

7 DÍAS	1/1	CI	68,8144	2,73804	3,9789
		CII	74,1278	4,05744	5,4736
		CIII	70,9428	0,66792	0,9415
		CIV	71,5094	3,13813	4,3884

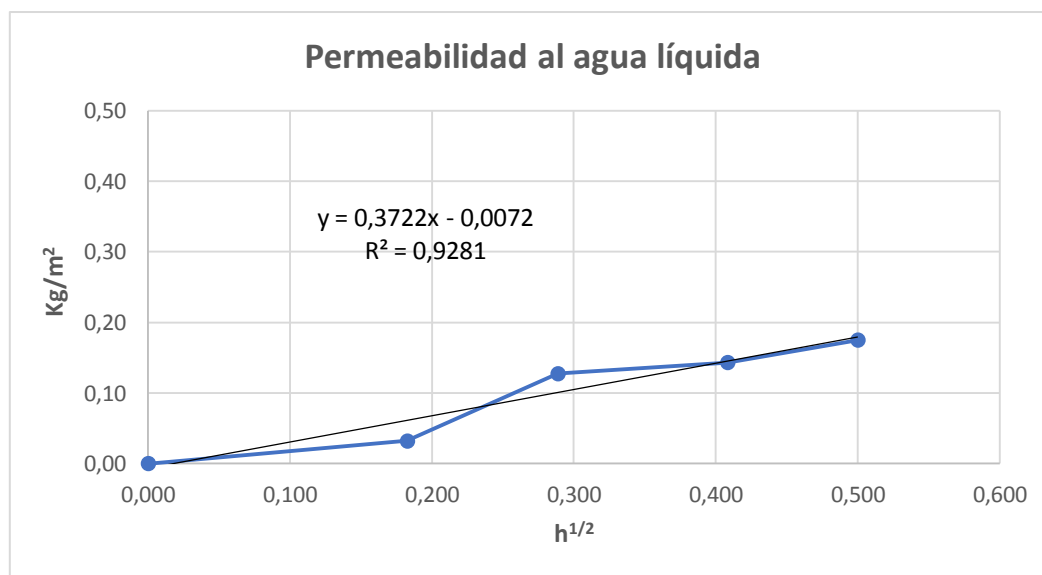
	Q COMPRESIÓN		Q COMPRESIÓN		T COMPRESIÓN		T COMPRESIÓN
	(kg)		(N)		(MPa)		(MPa)
ENSAYOS DE PROBETAS A 21 DÍAS	12530	11620	122794	113876	76,74625	71,1725	\bar{x} / S
	0	0	0	0	0	0	73,959375
	0	0	0	0	0	0	3,94123642
	14900	14620	146020	143276	91,2625	89,5475	\bar{x} / S
	0	0	0	0	0	0	90,405
	0	0	0	0	0	0	1,21268813
	13530	13590	132594	133182	82,87125	83,23875	\bar{x} / S
	0	0	0	0	0	0	83,055
	0	0	0	0	0	0	0,25986174
	13490	14170	132202	138866	82,62625	86,79125	\bar{x} / S
	0	0	0	0	0	0	84,70875
	0	0	0	0	0	0	2,94509974

		RELACION cemento/arido	T COMPRESIÓN		
			(MPa)		
21 DÍAS		1/1	\bar{x}	S	% S
			73,9600	3,94000	5,3272
			90,4100	1,21000	1,3383
			83,0600	0,26000	0,3130
			84,7100	2,95000	3,4825

3. Tablas de cálculos y graficas de absorción al agua líquida

CI BASE						
			1	1	1	W1
Tiempo (min)	h	$h^{1/2}$	ml	kg	Kg/m ²	Kg/m ² h ^{1/2}
0	0	0,000	0	0	0,00	0,00
2	0,0333	0,183	0,01	0,00001	0,03	0,17
5	0,0833	0,289	0,04	0,00004	0,13	0,44
10	0,1667	0,408	0,045	0,000045	0,14	0,35
15	0,25	0,500	0,055	0,000055	0,18	0,35

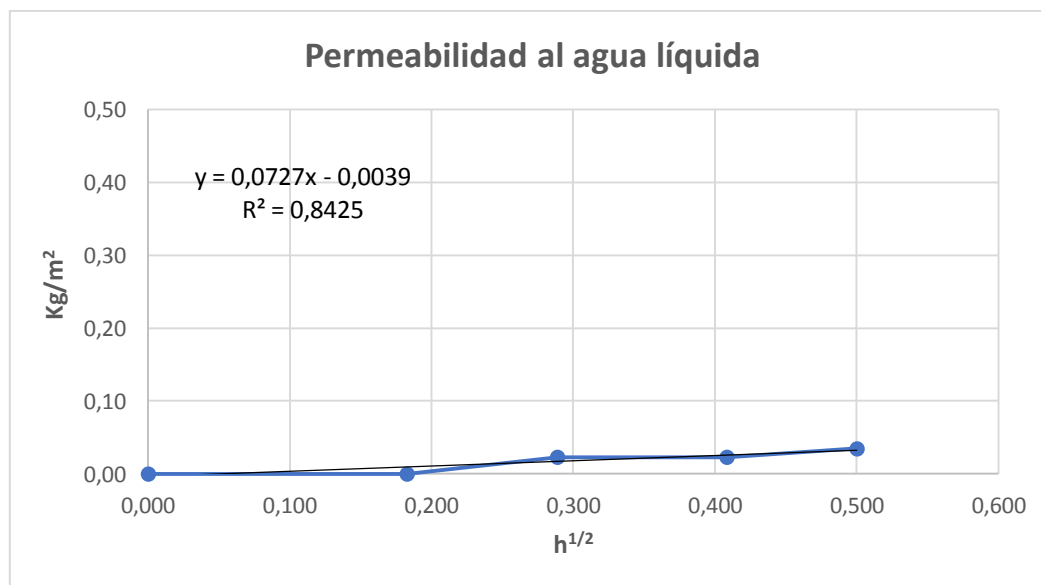
	cm	m
Diametro	2	0,02
Radi		0,01
Superficie (m ²)	0,000314	



Permeabilidad al agua líquida de CI BASE: **0,37 Kg/(m²h^{1/2})**

CII CENTRILIT NC						
			1	1	1	W1
Tiempo (min)	h	$h^{1/2}$	ml	kg	Kg/m^2	$\text{Kg/m}^2 h^{1/2}$
0	0	0,000	0	0	0,00	0,00
2	0,0333	0,183	0	0	0,00	0,00
5	0,0833	0,289	0,01	0,00001	0,02	0,08
10	0,1667	0,408	0,01	0,00001	0,02	0,06
15	0,25	0,500	0,015	0,000015	0,03	0,07

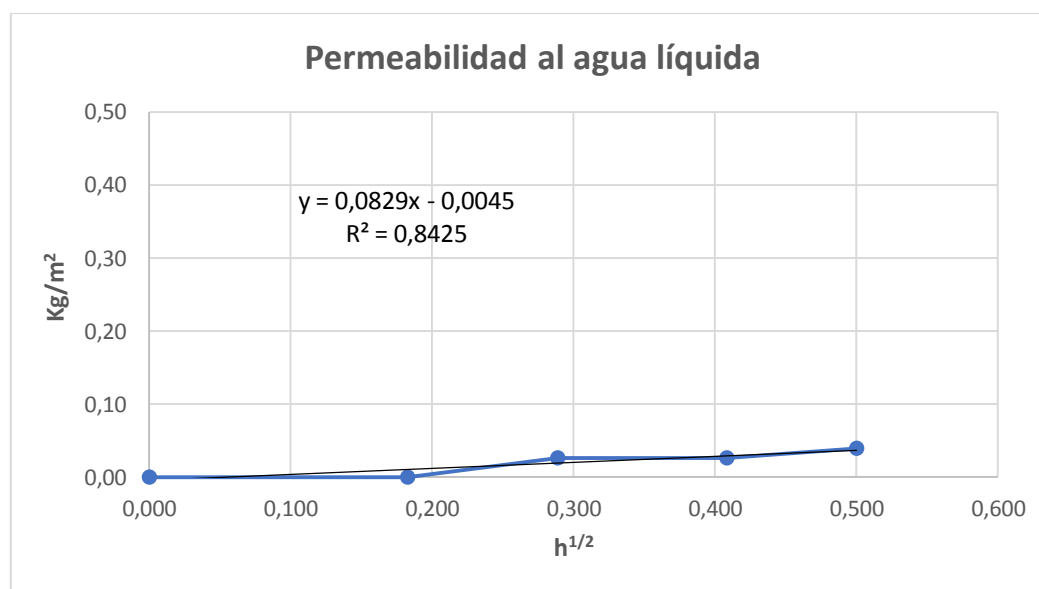
	cm	m
Diametro	2,35	0,0235
Radi		0,01175
Superficie (m^2)	0,000434	



Permeabilidad al agua líquida de CII CENTRILIT NC: **0,07 $\text{Kg}/(\text{m}^2 h^{1/2})$**

CIII SILICE FUME SX						
			1	1	1	W1
Tiempo (min)	h	$h^{1/2}$	ml	kg	Kg/m ²	Kg/m ² h ^{1/2}
0	0	0,000	0	0	0,00	0,00
2	0,0333	0,183	0	0	0,00	0,00
5	0,0833	0,289	0,01	0,00001	0,03	0,09
10	0,1667	0,408	0,01	0,00001	0,03	0,06
15	0,25	0,500	0,015	0,000015	0,04	0,08

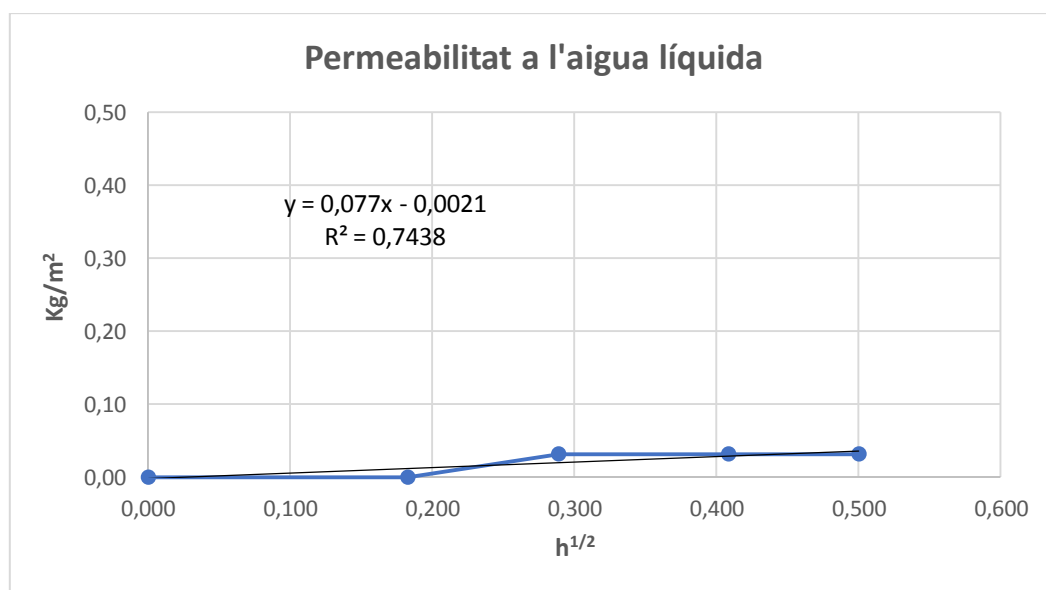
	cm	m
Diametro	2,2	0,022
Radi		0,011
Superficie (m ²)	0,00038	



Permeabilidad al agua líquida CIII SILICE FUME SX: **0,08 Kg/(m²h^{1/2})**

CIV NANOSILICE MasterRoc MS685						
			1	1	1	W1
Tiempo (min)	h	$h^{1/2}$	ml	kg	Kg/m ²	Kg/m ² h ^{1/2}
0	0	0,000	0	0	0,00	0,00
2	0,0333	0,183	0	0	0,00	0,00
5	0,0833	0,289	0,01	0,00001	0,03	0,11
10	0,1667	0,408	0,01	0,00001	0,03	0,08
15	0,25	0,500	0,01	0,00001	0,03	0,06

	cm	m
Diametro	2	0,02
Radi		0,01
Superficie (m ²)	0,000314	



Permeabilidad al agua líquida de CIV NANOSILICE MasterRoc MS685: **0,08 Kg/(m²h^{1/2})**

4. Tablas de cálculos de densidad aparente, densidad relativa. Porosidad

Referencias	Pes hidro.	Pes sat.	Pes sec
CI BASE	102,76	233,12	215,8
CII CENTRILIT NC	78,64	179,54	165,35
CIII SILICE FUME SX	79,82	180,38	171,27
CIV NANOSILICE MasterRoc MS685	76,6	175,4	160,9

Referencias	Dens. apar.	Dens. rel.	Porositat
CI BASE	2,10	2,53	16,9
CII CENTRILIT NC	2,10	2,57	18,0
CIII SILICE FUME SX	2,15	2,42	11,4
CIV NANOSILICE MasterRoc MS685	2,10	2,59	18,9
	gr/cm ³	gr/cm ³	%

5. Tablas de cálculos y graficas de permeabilidad al vapor de agua

CONSTANTES CÁLCULO CIV-1			
Λ (Kg/(m ² ·s·Pa))	permeanza al vapor de agua		
W_{vp}	permeavilidad vapor agua		
δa	permeavilidad vapor agua al aire =		1,952E-10
W_r cambra	0,53	Humedad relativa de la cámara (p.e. 50%)=0,5	
T cambra °C	23,15	Temperatura ambiente	
W_r solucion:	1	Humedad relativa de la solución (p.e. 100%)=1	
Δp :	-1331,69	fórmula que relaciona humedades y temperatura	

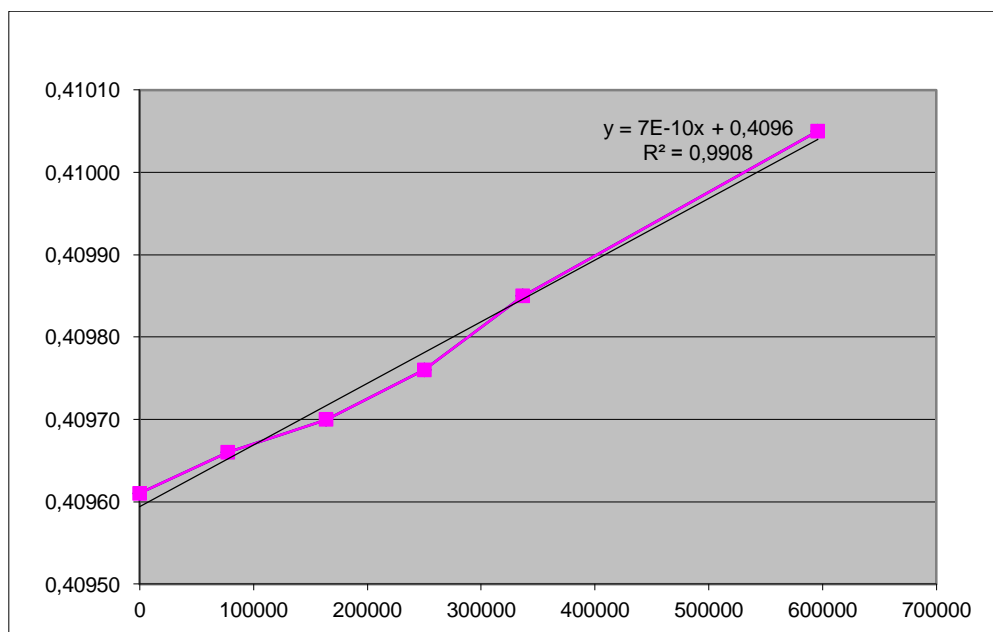
CIV Nanosilice MasteRoc MS685

CIV-1

día	hora exacta	hora	segundos	massa (g)	massa KG	pendent
11/6/2018	0	0,00	0	409,61	0,40961	0,40961
12/6/2018	21,5	21,50	77400	409,66	0,40966	0,40966
13/6/2018	24	45,50	163800	409,7	0,40970	0,40970
14/6/2018	24	69,50	250200	409,76	0,40976	0,40976
15/6/2018	24	93,50	336600	409,85	0,40985	0,40985
18/6/2018	72	165,50	595800	410,05	0,41005	0,41005

Superficie (m ²):	0,0021
Grosor (m):	0,0175

G (Kg/s) pendent recta	$g=G/A$ (Kg/(sm ²)) densidad flujo	$W=g/\Delta P_v$ Kg/(m2segPascal) Permeancia	$Z=1/W$ (m ² segPascal)/Kg Resistencia al vapor agua	$\delta=W*d$ Kg/(msPa) Permeabi. al vapor de agua	$\mu=\delta a/\delta$ Factor resistencia al vapor de agua
7,0000E-10	3,3333E-07	-2,5031E-10	-3,9951E+09	-4,3804E-12	-44,56

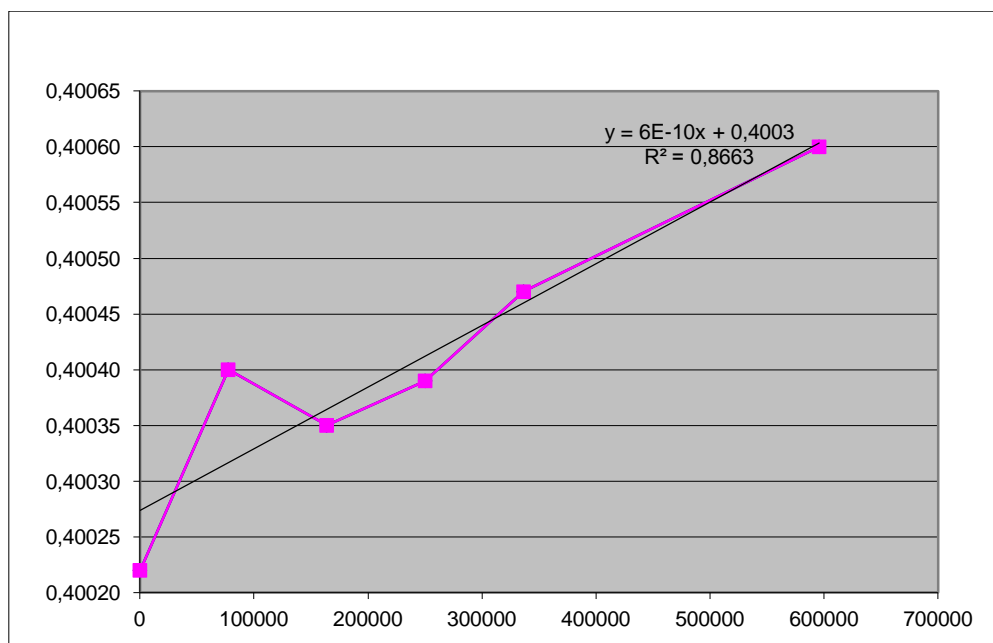


CIV-2

día	hora exacta	hora	segundos	massa (g)	massa KG	pendent
11/6/2018	0	0,00	0	400,22	0,40022	0,40022
12/6/2018	21,5	21,50	77400	400,4	0,40040	0,40040
13/6/2018	24	45,50	163800	400,35	0,40035	0,40035
14/6/2018	24	69,50	250200	400,39	0,40039	0,40039
15/6/2018	24	93,50	336600	400,47	0,40047	0,40047
18/6/2018	72	165,50	595800	400,6	0,40060	0,40060

Superficie (m ²):	0,0018
Grosor (m):	0,0165

G (Kg/s) pendent recta	$g=G/A$ (Kg/(sm ²)) densidad flujo	$W=g/\Delta P_v$ Kg/(m2segPascal) Permeancia	$Z=1/W$ (m ² segPascal)/Kg Resistencia al vapor agua	$\delta=W*d$ Kg/(msPa) Permeabi. al vapor de agua	$\mu=\delta a/\delta$ Factor resistencia al vapor de agua
6,0000E-10	3,3333E-07	-2,5031E-10	-3,9951E+09	-4,13009E-12	-47,26

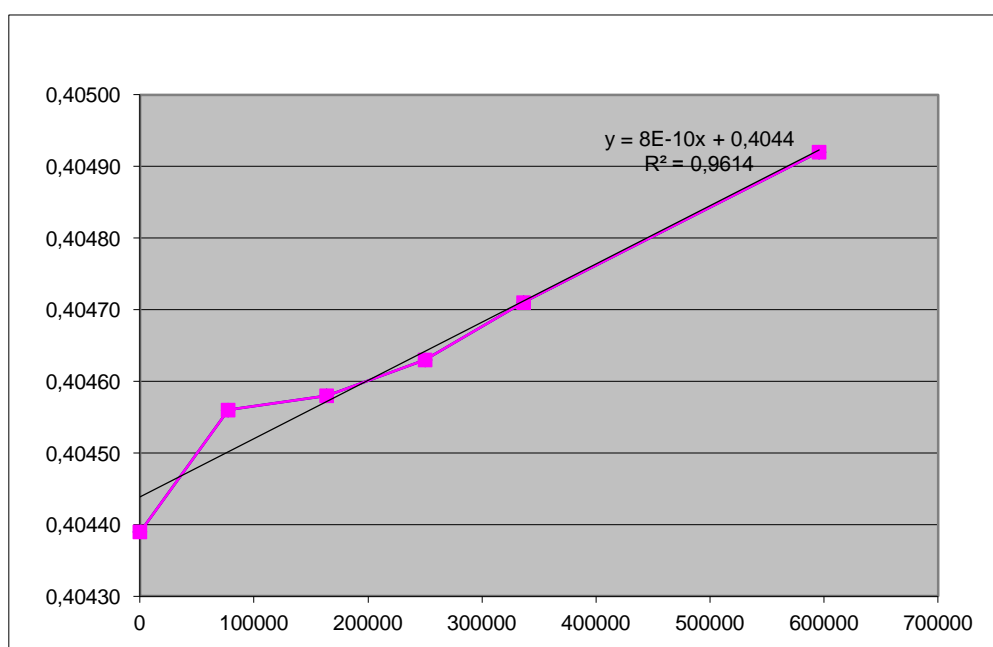


CIV-3

día	hora exacta	hora	segundos	massa (g)	massa KG	pendent
11/6/2018	0	0,00	0	404,39	0,40439	0,40439
12/6/2018	21,5	21,50	77400	404,56	0,40456	0,40456
13/6/2018	24	45,50	163800	404,58	0,40458	0,40458
14/6/2018	24	69,50	250200	404,63	0,40463	0,40463
15/6/2018	24	93,50	336600	404,71	0,40471	0,40471
18/6/2018	72	165,50	595800	404,92	0,40492	0,40492

Superficie (m ²):	0,002
Grosor (m):	0,0165

G (Kg/s) pendent recta	$g=G/A$ (Kg/(sm ²)) densidad flujo	$W=g/\Delta P_v$ Kg/(m2segPascal) Permeancia	$Z=1/W$ (m ² segPascal)/Kg Resistencia al vapor agua	$\delta=W*d$ Kg/(msPa) Permeabi. al vapor de agua	$\mu=\delta a/\delta$ Factor resistencia al vapor de agua
8,0000E-10	4,0000E-07	-3,0037E-10	-3,3292E+09	-4,95611E-12	-39,39



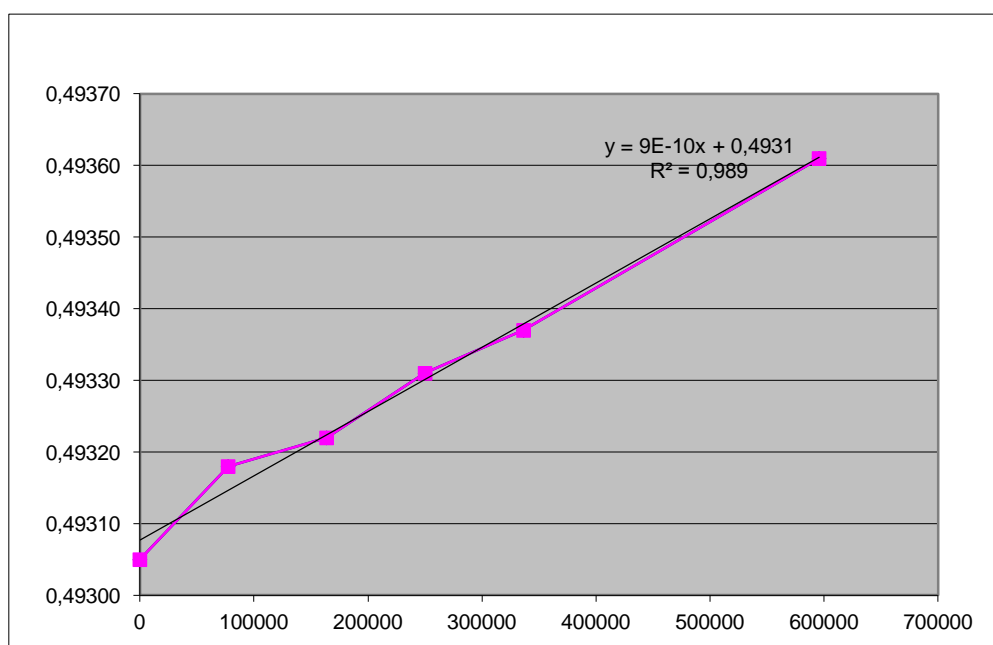
CI BASE

CI-1

día	hora exacta	hora	segundos	massa (g)	massa KG	pendent
11/6/2018	0	0,00	0	493,05	0,49305	0,49305
12/6/2018	21,5	21,50	77400	493,18	0,49318	0,49318
13/6/2018	24	45,50	163800	493,22	0,49322	0,49322
14/6/2018	24	69,50	250200	493,31	0,49331	0,49331
15/6/2018	24	93,50	336600	493,37	0,49337	0,49337
18/6/2018	72	165,50	595800	493,61	0,49361	0,49361

Superficie (m ²):	0,0023
Grosor (m):	0,019

G (Kg/s) pendent recta	$g=G/A$ (Kg/(sm ²)) densidad flujo	$W=g/\Delta P_v$ Kg/(m2segPascal) Permeancia	$Z = 1/W$ (m ² segPascal)/Kg Resistencia al vapor agua	$\delta=W*d$ Kg/(msPa) Permeabi. al vapor de agua	$\mu=\delta a/\delta$ Factor resistencia al vapor de agua
9,0000E-10	3,9130E-07	-2,9384E-10	-3,4032E+09	-5,58297E-12	-34,96

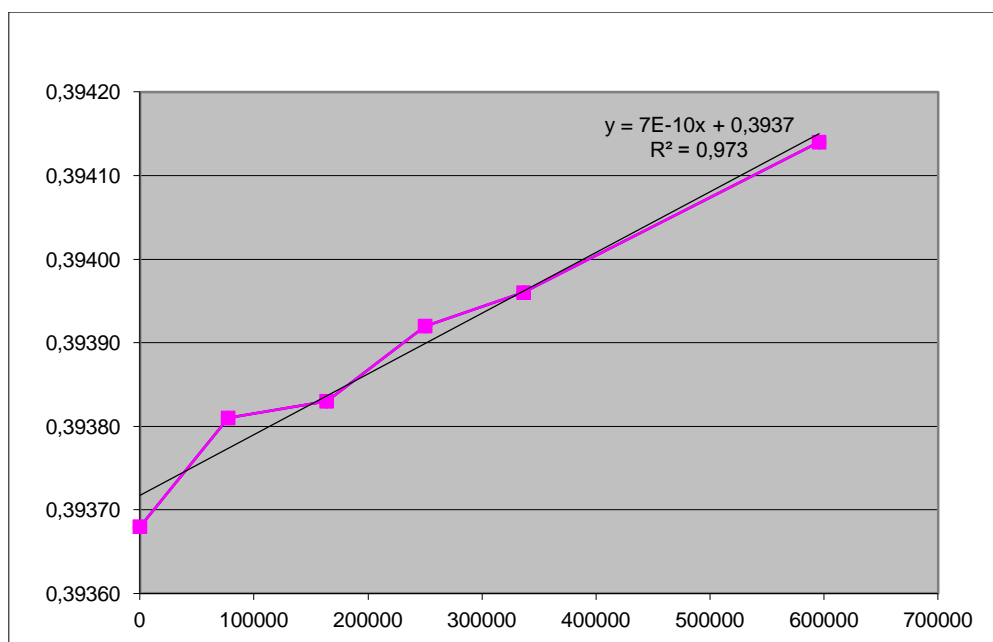


CI-2

día	hora exacta	hora	segundos	massa (g)	massa KG	pendent
11/6/2018	0	0,00	0	393,68	0,39368	0,39368
12/6/2018	21,5	21,50	77400	393,81	0,39381	0,39381
13/6/2018	24	45,50	163800	393,83	0,39383	0,39383
14/6/2018	24	69,50	250200	393,92	0,39392	0,39392
15/6/2018	24	93,50	336600	393,96	0,39396	0,39396
18/6/2018	72	165,50	595800	394,14	0,39414	0,39414

Superficie (m ²):	0,00185
Grosor (m):	0,0175

G (Kg/s) pendent recta	$g=G/A$ (Kg/(sm ²)) densidad flujo	$W=g/\Delta P_v$ Kg/(m2segPascal) Permeancia	$Z=1/W$ (m ² segPascal)/Kg Resistencia al vapor agua	$\delta=W*d$ Kg/(msPa) Permeabi. al vapor de agua	$\mu=\delta a/\delta$ Factor resistencia al vapor de agua
7,0000E-10	3,7838E-07	-2,8413E-10	-3,5195E+09	-4,97234E-12	-39,26

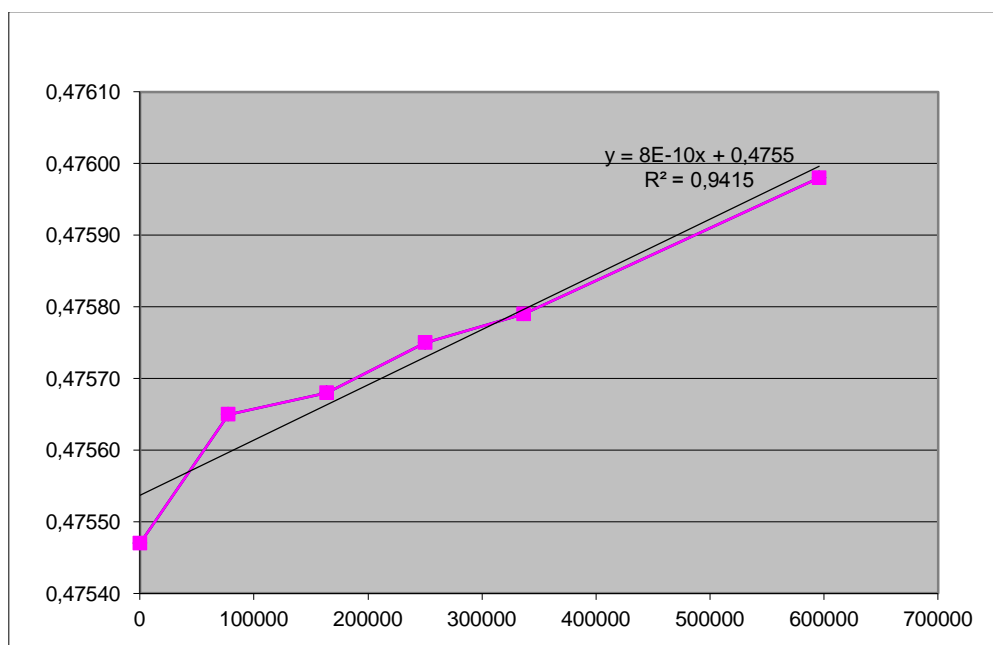


CI-3

día	hora exacta	hora	segundos	massa (g)	massa KG	pendent
11/6/2018	0	0,00	0	475,47	0,47547	0,47547
12/6/2018	21,5	21,50	77400	475,65	0,47565	0,47565
13/6/2018	24	45,50	163800	475,68	0,47568	0,47568
14/6/2018	24	69,50	250200	475,75	0,47575	0,47575
15/6/2018	24	93,50	336600	475,79	0,47579	0,47579
18/6/2018	72	165,50	595800	475,98	0,47598	0,47598

Superficie (m ²):	0,0023
Grosor (m):	0,017

G (Kg/s) pendent recta	$g=G/A$ (Kg/(sm ²)) densidad flujo	$W=g/\Delta P_v$ Kg/(m2segPascal) Permeancia	$Z=1/W$ (m ² segPascal)/Kg Resistencia al vapor agua	$\delta=W*d$ Kg/(msPa) Permeabi. al vapor de agua	$\mu=\delta a/\delta$ Factor resistencia al vapor de agua
8,0000E-10	3,4783E-07	-2,6119E-10	-3,8286E+09	-4,44025E-12	-43,96



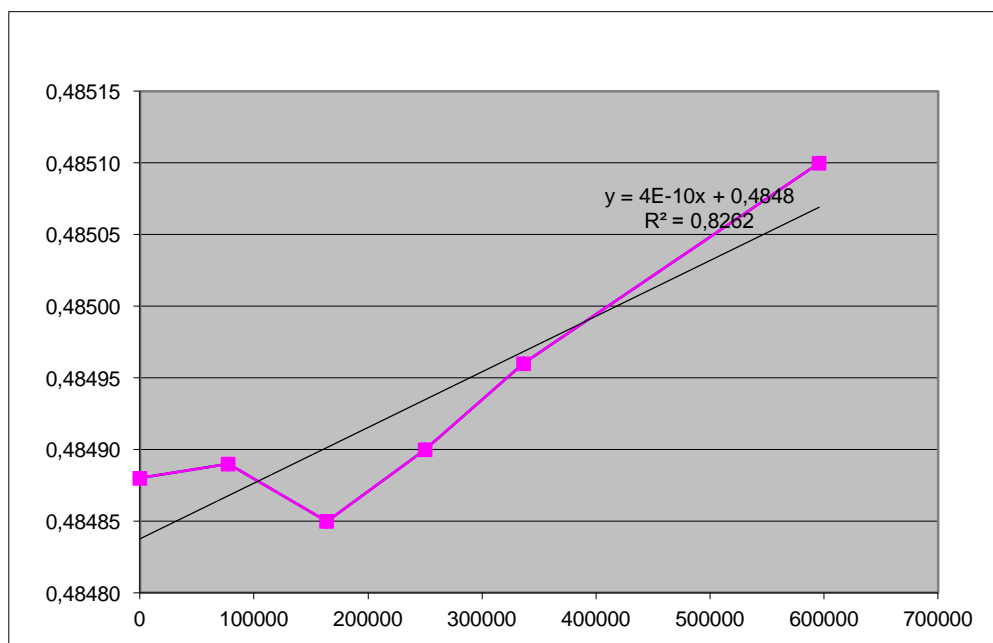
CII CENTRILIT NC

CII-1

día	hora exacta	hora	segundos	massa (g)	massa KG	pendent
11/6/2018	0	0,00	0	484,88	0,48488	0,48488
12/6/2018	21,5	21,50	77400	484,89	0,48489	0,48489
13/6/2018	24	45,50	163800	484,85	0,48485	0,48485
14/6/2018	24	69,50	250200	484,9	0,48490	0,48490
15/6/2018	24	93,50	336600	484,96	0,48496	0,48496
18/6/2018	72	165,50	595800	485,1	0,48510	0,48510

Superficie (m ²):	0,0022
Grosor (m):	0,018

G (Kg/s) pendent recta	$g=G/A$ (Kg/(sm ²)) densidad flujo	$W=g/\Delta P_v$ Kg/(m2segPascal) Permeancia	$Z = 1/W$ (m ² segPascal)/Kg Resistencia al vapor agua	$\delta=W*d$ Kg/(msPa) Permeabi. al vapor de agua	$\mu=\delta a/\delta$ Factor resistencia al vapor de agua
4,0000E-10	1,8182E-07	-1,3653E-10	-7,3243E+09	-2,45757E-12	-79,43

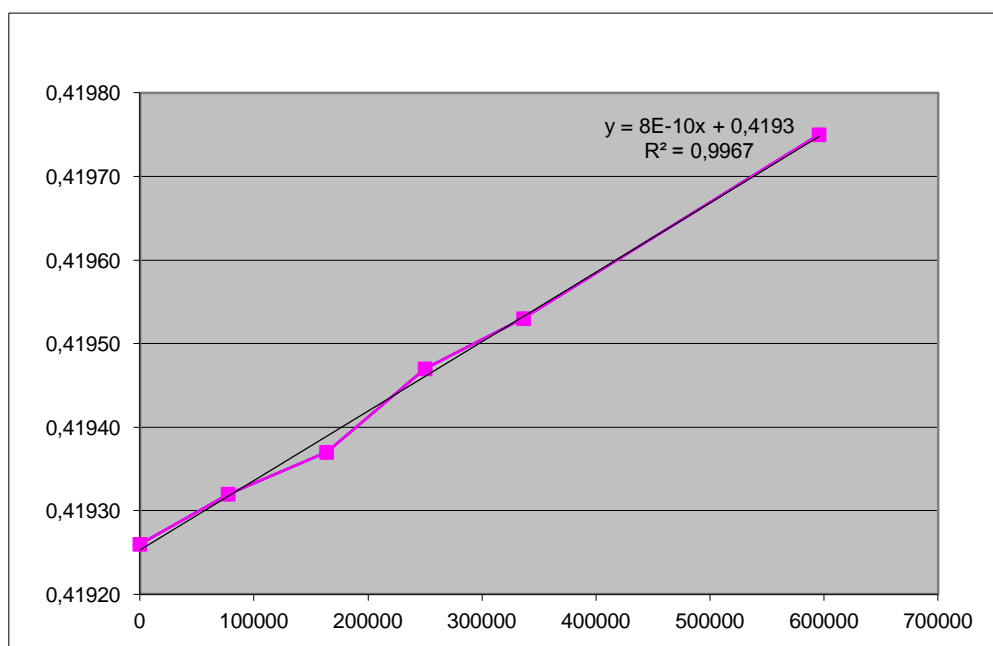


CII-2

día	hora exacta	hora	segundos	massa (g)	massa KG	pendent
11/6/2018	0	0,00	0	419,26	0,41926	0,41926
12/6/2018	21,5	21,50	77400	419,32	0,41932	0,41932
13/6/2018	24	45,50	163800	419,37	0,41937	0,41937
14/6/2018	24	69,50	250200	419,47	0,41947	0,41947
15/6/2018	24	93,50	336600	419,53	0,41953	0,41953
18/6/2018	72	165,50	595800	419,75	0,41975	0,41975

Superficie (m ²):	0,0021
Grosor (m):	0,017

G (Kg/s) pendent recta	$g=G/A$ (Kg/(sm ²)) densidad flujo	$W=g/\Delta P_v$ Kg/(m2segPascal) Permeancia	$Z=1/W$ (m ² segPascal)/Kg Resistencia al vapor agua	$\delta=W*d$ Kg/(msPa) Permeabi. al vapor de agua	$\mu=\delta a/\delta$ Factor resistencia al vapor de agua
9,0000E-10	4,2857E-07	-3,2183E-10	-3,1073E+09	-5,47103E-12	-35,68

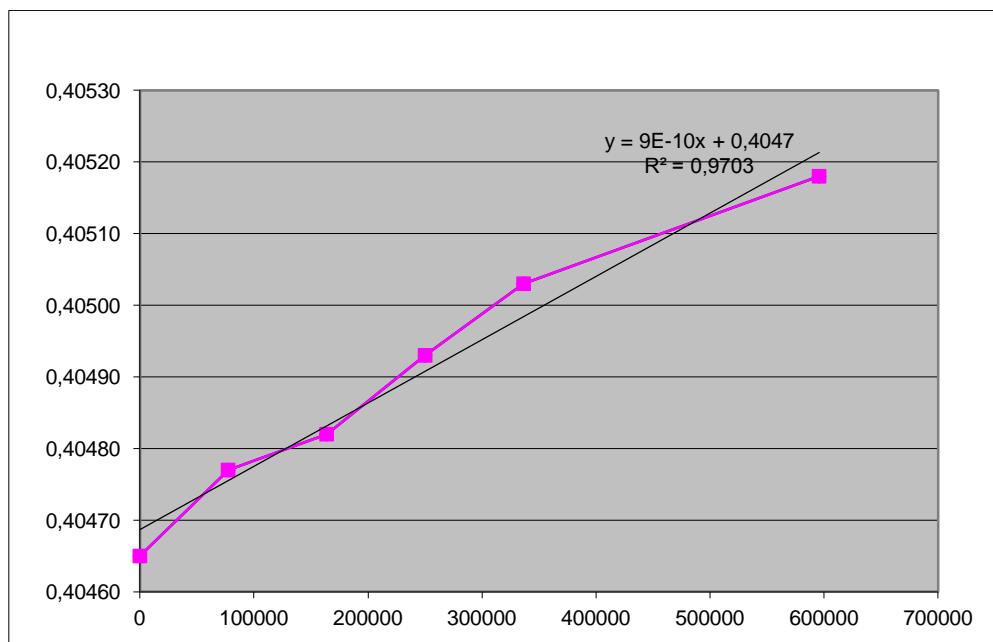


CII-3

día	hora exacta	hora	segundos	massa (g)	massa KG	pendent
11/6/2018	0	0,00	0	404,65	0,40465	0,40465
12/6/2018	21,5	21,50	77400	404,77	0,40477	0,40477
13/6/2018	24	45,50	163800	404,82	0,40482	0,40482
14/6/2018	24	69,50	250200	404,93	0,40493	0,40493
15/6/2018	24	93,50	336600	405,03	0,40503	0,40503
18/6/2018	72	165,50	595800	405,18	0,40518	0,40518

Superficie (m ²):	0,0021
Grosor (m):	0,0175

G (Kg/s) pendent recta	$g=G/A$ (Kg/(sm ²)) densidad flujo	$W=g/\Delta P v$ Kg/(m2segPascal) Permeancia	$Z=1/W$ (m ² segPascal)/Kg Resistencia al vapor agua	$\delta=W*d$ Kg/(msPa) Permeabi. al vapor de agua	$\mu=\delta a/\delta$ Factor resistencia al vapor de agua
9,0000E-10	4,2857E-07	-3,2183E-10	-3,1073E+09	-5,63194E-12	-34,66



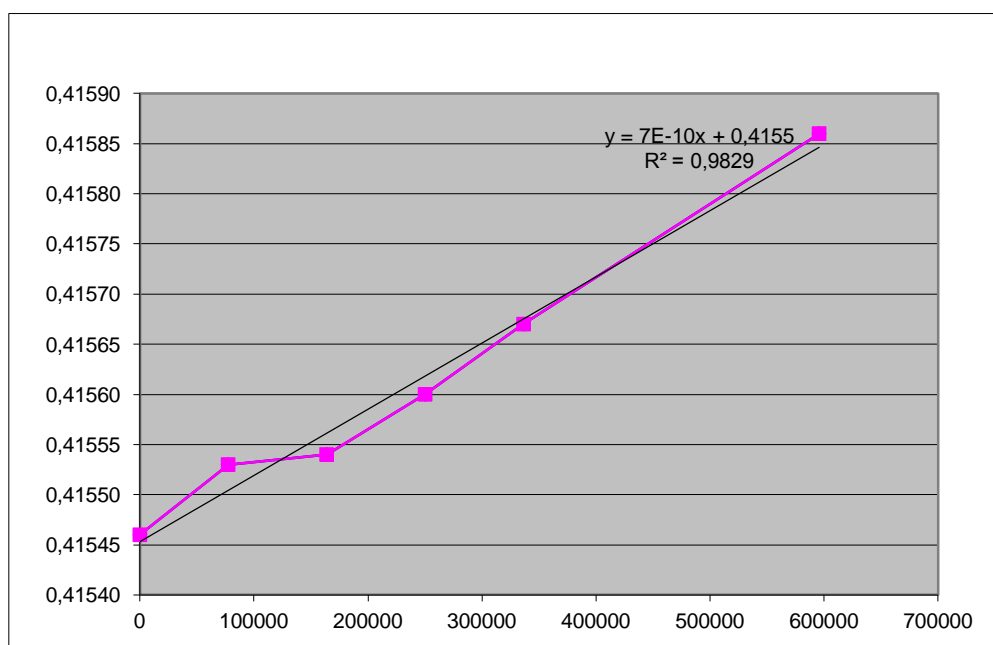
CIII SILICE FUME

CIII-1

día	hora exacta	hora	segundos	massa (g)	massa KG	pendent
11/6/2018	0	0,00	0	415,46	0,41546	0,41546
12/6/2018	21,5	21,50	77400	415,53	0,41553	0,41553
13/6/2018	24	45,50	163800	415,54	0,41554	0,41554
14/6/2018	24	69,50	250200	415,6	0,41560	0,41560
15/6/2018	24	93,50	336600	415,67	0,41567	0,41567
18/6/2018	72	165,50	595800	415,86	0,41586	0,41586

Superficie (m ²):	0,0021
Grosor (m):	0,0175

G (Kg/s) pendent recta	$g=G/A$ (Kg/(sm ²)) densidad flujo	$W=g/\Delta P_v$ Kg/(m2segPascal) Permeancia	$Z = 1/W$ (m ² segPascal)/Kg Resistencia al vapor agua	$\delta=W*d$ Kg/(msPa) Permeabi. al vapor de agua	$\mu=\delta a/\delta$ Factor resistencia al vapor de agua
7,0000E-10	3,3333E-07	-2,5031E-10	-3,9951E+09	-4,3804E-12	-44,56

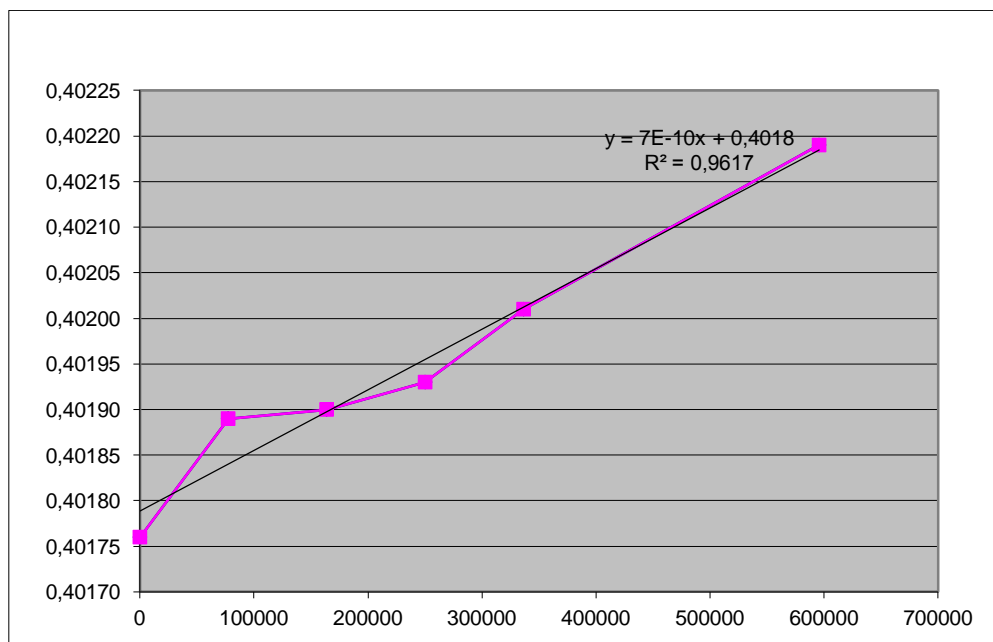


CIII-2

día	hora exacta	hora	segundos	massa (g)	massa KG	pendent
11/6/2018	0	0,00	0	401,76	0,40176	0,40176
12/6/2018	21,5	21,50	77400	401,89	0,40189	0,40189
13/6/2018	24	45,50	163800	401,9	0,40190	0,40190
14/6/2018	24	69,50	250200	401,93	0,40193	0,40193
15/6/2018	24	93,50	336600	402,01	0,40201	0,40201
18/6/2018	72	165,50	595800	402,19	0,40219	0,40219

Superficie (m ²):	0,0023
Grosor (m):	0,0185

G (Kg/s) pendent recta	$g=G/A$ (Kg/(sm ²)) densidad flujo	$W=g/\Delta P_v$ Kg/(m2segPascal) Permeancia	$Z=1/W$ (m ² segPascal)/Kg Resistencia al vapor agua	$\delta=W*d$ Kg/(msPa) Permeabi. al vapor de agua	$\mu=\delta a/\delta$ Factor resistencia al vapor de agua
7,0000E-10	3,0435E-07	-2,2854E-10	-4,3756E+09	-4,22804E-12	-46,17

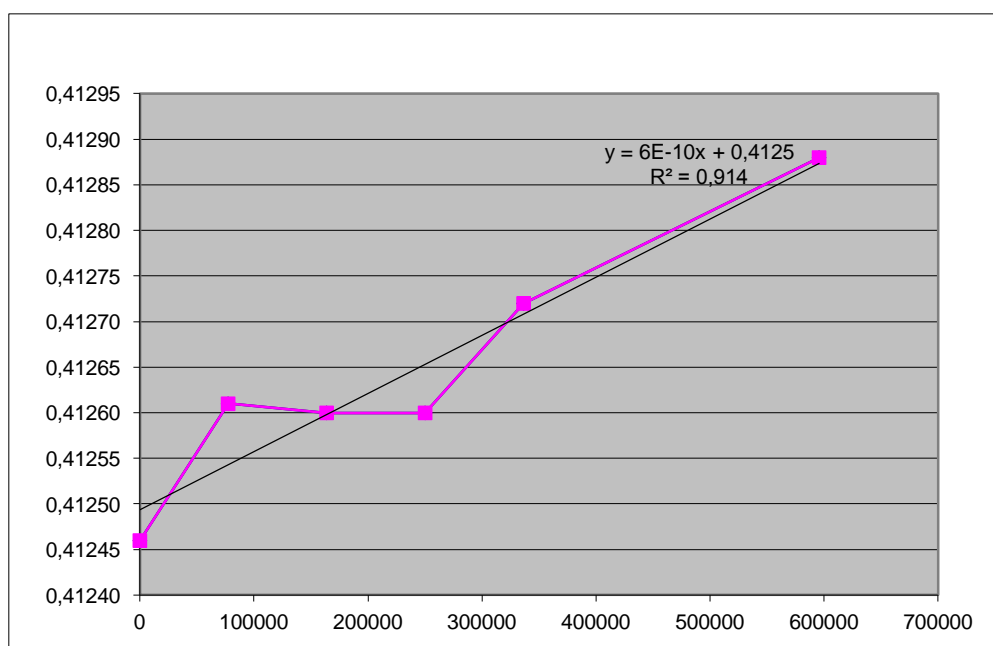


CIII-3

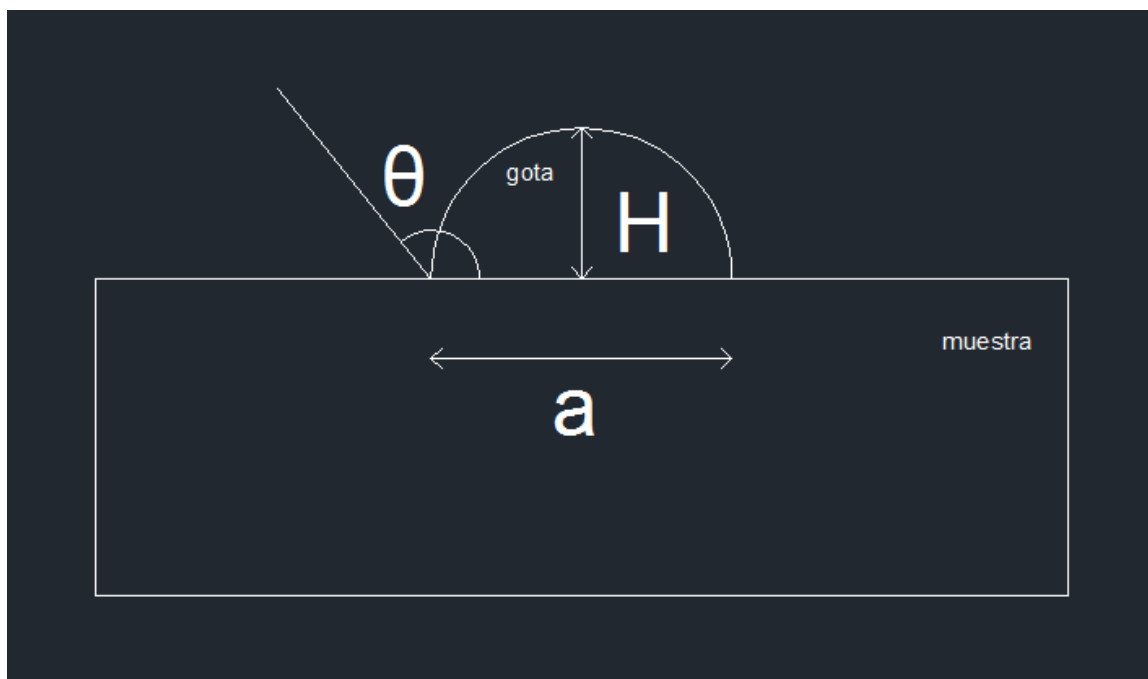
día	hora exacta	hora	segundos	massa (g)	massa KG	pendent
11/6/2018	0	0,00	0	412,46	0,41246	0,41246
12/6/2018	21,5	21,50	77400	412,61	0,41261	0,41261
13/6/2018	24	45,50	163800	412,6	0,41260	0,41260
14/6/2018	24	69,50	250200	412,6	0,41260	0,41260
15/6/2018	24	93,50	336600	412,72	0,41272	0,41272
18/6/2018	72	165,50	595800	412,88	0,41288	0,41288

Superficie (m ²):	0,0021
Grosor (m):	0,0175

G (Kg/s) pendent recta	$g=G/A$ (Kg/(sm ²)) densidad flujo	$W=g/\Delta P_v$ Kg/(m2segPascal) Permeancia	$Z = 1/W$ (m ² segPascal)/Kg Resistencia al vapor agua	$\delta=W*d$ Kg/(msPa) Permeabi. al vapor de agua	$\mu=\delta a/\delta$ Factor resistencia al vapor de agua
6,0000E-10	2,8571E-07	-2,1455E-10	-4,6609E+09	-3,75463E-12	-51,99



6. Cálculos de resultados de determinación del ángulo estático



Formula de calculo de θ

$$\theta = 2 \arctan(2H/a)$$

Portland

$a = 0.0083$
 $H = 0.0006$

La imagen muestra un cubo de muestra de Portland en un laboratorio, con el número "1" visible en su cara lateral. El fondo muestra otros equipos de laboratorio.

Base



$$a=0.0065$$
$$H= 0.0018$$

Centrilit



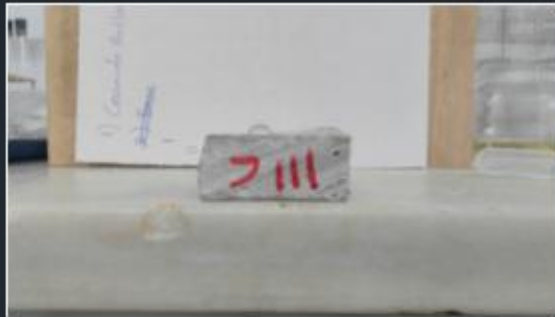
$$a=0.0067$$
$$H= 0.0025$$

Nanosilice



$a=0.0050$
 $H=0.0021$

□ Fume



$a=0.0068$
 $H=0.0031$